





О. И. РЕПИНА

ИСКАЖЕНИЯ В ТЕЛЕФОННОМ ТРАКТЕ







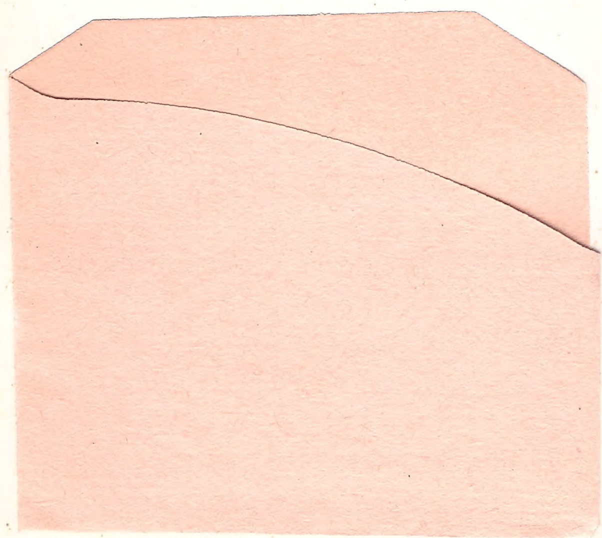












О. И. РЕПИНА

ИСКАЖЕНИЯ В ТЕЛЕФОННОМ ТРАКТЕ





МОСКВА «СВЯЗЬ» 1978

32.882
Р41
УДК 621.395

Репина О. И.

Р41 Искажения в телефонном тракте. — М.: Связь, 1978. — 176 с., ил.

60 к.

В книге рассматриваются линейные и нелинейные искажения в НЧ телефонном тракте и их влияние на качество передаваемой по нему речи. Анализируется лимитирующее действие помех (местного эффекта, линейных электрических, переходных разговоров) на предельно целесообразные характеристики телефонного аппарата, микрофона и телефона. Рассматривается характер явлений при нелинейных искажениях. Устанавливается математическая связь между формой амплитудной характеристики и уровнем ощущения речи. С помощью полученных соотношений анализируется влияние нелинейных искажений на разборчивость речи.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся исследованиями, разработкой, производством телефонных аппаратов.

Р $\frac{30602-102}{045(01)-78}$ 46—78

ББК 32.882
6Ф1.2

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопросы влияния линейных (амплитудных) и нелинейных искажений в низкочастотном телефонном тракте недостаточно освещены в литературе. Часть этих материалов рассредоточена по различным изданиям, в том числе ведомственным; ряд разделов содержится в книге М. А. Сапожкова [4], а по нелинейным искажениям — в специальной литературе, посвященной этому вопросу.

Данная работа представляет собой попытку обобщить указанные материалы применительно к телефонным аппаратам и НЧ телефонным трактам и дополнить их работами автора по разделам, не нашедшим отражения в публикациях. Вследствие ограниченного объема книги ряд вопросов изложен кратко, иногда даются только ссылки на литературные источники.

К настоящему времени в результате длительного совершенствования телефонных аппаратов в ряде стран, в том числе и в СССР, характеристики аппаратов вплотную приблизились к международным нормам на эквивалент затухания по громкости (при этом борьба ведется буквально за каждый децибел повышения эффективности), а также в некоторых случаях к предельным техническим возможностям обычных конструкций электроакустических преобразователей.

Появление транзисторных усилителей, которые уже нашли применение в ряде телефонных аппаратов, и микросхем открывает широкие возможности для повышения чувствительности аппарата на передачу и прием, расширения полосы эффективно передаваемых частот, вариаций частотной и амплитудной характеристиками, изъятия угольного микрофона, уменьшения вредного влияния нелинейных искажений, а в конечном итоге — для повышения качества передачи, шумостойкости, перекрываемого затухания. Все известные методы воздействия на качество передачи, которые раньше не могли найти применения в телефонных аппаратах, теперь становятся для них более доступными, а потому рассматриваются в данной работе несколько шире, чем это соответствует их роли в настоящее время.

В связи с новыми возможностями встает вопрос об эффективности, целесообразности, а в ряде случаев допустимости (с точки зрения помехоустойчивости) применения в общей системе телефонной связи более мощных и широкополосных телефонных аппаратов и о факторах, мешающих повышению эффективности. Эти вопросы не нашли отражения в литературе. В данной работе сделана попытка восполнить указанный пробел.

Нелинейным искажениям, механизму их действия, влиянию в телефонном тракте на речь и помехи посвящена большая часть книги (за исключением первых двух глав, где вопросы рассмат-

риваются в пределах линейных соотношений). Это обусловлено, наряду с недостаточным освещением данного вопроса в книгах и статьях, относящихся к области телефонной электроакустики, также следующими обстоятельствами:

а) общим повышением требований к качеству, в том числе и телефонной связи;

б) широким применением нелинейных элементов и устройств — угольных микрофонов старого образца с большой нелинейностью, которыми насыщена телефонная сеть и которые еще многие годы будут определять качество телефонной связи; нелинейных элементов и устройств в телефонных аппаратах для АРУ, улучшения противоместных свойств и т. д.; ограничителей больших амплитуд для защиты уха человека от перегрузки и акустических ударов; ограничителей по максимуму и минимуму, в том числе с резкой отсечкой, для борьбы с разного рода помехами; нелинейных устройств для подавления помех в паузах речи в громкоговорящих телефонных аппаратах, управляемых голосом, и т. д.;

в) негативное влияние нелинейных искажений — не единственная сторона их проявления. Когда они вводятся в тракт специально, возникает вопрос о допустимой величине их.

Основным нелинейным элементом существующих телефонных аппаратов является угольный микрофон. Рассмотрение работы этого микрофона обычно не выходит за рамки описания его как генератора электрических колебаний, возбуждаемых в микрофонной цепи изменяющимся сопротивлением. Поэтому представлялось целесообразным привести материалы исследований нелинейных искажений угольного микрофона и микрофонной цепи, которые, хотя и получены довольно давно, но не публиковались в широкой печати (см. приложение 2).

Приношу глубокую благодарность проф. Н. Б. Покровскому за ценные замечания по рукописи книги, а также канд. техн. наук А. А. Бобкову за решение задачи о разложении степенной функции в степенной ряд, что позволило связать показатель нелинейности с коэффициентами степенного полинома, а через них — с гармоническим рядом.

Автор

1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ (В ПРЕДЕЛАХ ЛИНЕЙНЫХ СООТНОШЕНИЙ)

1.1. ШИРИНА ПОЛОСЫ ЭФФЕКТИВНО ПЕРЕДАВАЕМЫХ ЧАСТОТ

Влияние ограничения полосы частот на разборчивость речи изучалось многими авторами [19, 20, 53—58]. На рис. 1.1 приведены зависимости слоговой разборчивости S русской речи от пропускаемой полосы частот при ограничении спектра снизу (кривая *1*) и сверху (кривая *4*). Исследования проводились [1, 20] на высококачественном тракте при оптимальном уровне речи и отсутствии каких-либо потерь или помех в тракте.

Из этих зависимостей следует, что потеря слоговой разборчивости (по абсолютной величине) не превысит 1% при срезании нижних частот до 600—650 Гц, а верхних — выше 5000 Гц. Если бы удалось передать речь без каких-либо потерь и искажений, кроме ограничения полосы сверху и снизу, то для достижения, предположим, 80% слоговой разборчивости достаточно было бы иметь полосу частот 600—2300 Гц, т. е. ограничить ее десятью частотными полосами при ширине передаваемого спектра около 1800 Гц, или меньше 20% общего речевого диапазона. В качестве нижней границы МККТТ рекомендует частоту 300 Гц (так как ухо способно восстанавливать низкие частоты), а верхней—3400Гц.

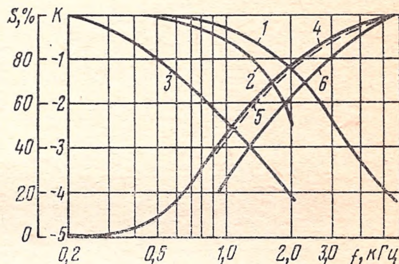


Рис. 1.1. Влияние ограничения полосы частот снизу (кривые *1, 2, 3*) и сверху (кривые *(4, 5, 6)* на слоговую разборчивость речи S (кривые *1, 4*), интегральную оценку качества K с уравниванием громкостей (кривые *2, 5*) и без уравнивания громкостей (кривые *3, 6*)

О влиянии крайних частот диапазона на общую разборчивость можно судить по сравнительной ширине Δf полос равной разборчивости (содержащих по 5% формантной разборчивости) [1]. В области самых нижних частот $\Delta f = 320$ Гц, т. е. примерно в 2 раза шире, чем на частотах, лежащих выше (400—2300) Гц, где расположены самые узкие полосы Δf. В верхней половине диапа-

зона (5000—10 000 Гц) расположены всего две полосы Δf, ширина каждой из которых больше чем в 10 раз превышает Δf на средних частотах.

Как следует из ряда работ, для телефонного тракта в условиях шумов ограничение частотного диапазона пределами 300—3500 Гц приводит даже к некоторому повышению разборчивости; при дальнейшем сужении диапазона разборчивость речи снижается. В громкоговорящих телефонных аппаратах, управляемых голосом, срезание нижних частот дает в условиях шумов (характерных для НЧ телефонных трактов) значительное повышение шумозащищенности [17].

Результаты исследования зависимости интегральной абонентской оценки качества речи от ограничения полосы частот также представлены на рис. 1.1 [2]. Исследования проводились на высококачественном тракте при отсутствии каких-либо потерь, кроме обусловленных ограничением полосы частот для двух случаев: без компенсации потерь громкости за счет сокращения полосы частот (кривые *3, 6*) и с уравненной громкостью (кривые *2, 5*). Из этих кривых следует, что оценки при неуравновешенных громкостях значительно ниже, чем при уравновешенных, особенно в области влияния нижних частот, где сосредоточена бóльшая часть энергии речи. Это свидетельствует о том, что абоненты в своей оценке кроме частотных искажений учитывали также громкость передачи. Устранение этого фактора путем уравнивания громкостей позволило получить зависимость оценки только от ограничения полосы частот. Сопоставление этой зависимости для интегральной оценки качества с аналогичной зависимостью для разборчивости речи позволяет сделать следующие выводы:

1. При срезании частот сверху кривые для интегральной оценки не отличаются от кривых для разборчивости речи. Здесь законы распределения оценок K и S хорошо совпадают. Несмотря на разницу в критериях, можно заметить, что в области верхних частот диапазона содержится информация о натуральности звучания речи, зависящая только от ее разборчивости. Расхождения между уровнями спектров речи и формант в этой области незначительны. Их следует, по-видимому, отнести за счет того, что в спектрах звуков содержатся неформантные составляющие, которые не определяют разборчивость речи, но и не определяют натуральность звучания.

2. При тех же условиях срезание нижних частот более значительно влияет на качество, чем на разборчивость. Кривые зависимости качества от ограничения полосы частот идут круче, чем кривые разборчивости речи.

Сокращение полосы частот начинает сказываться на качестве звучания речи, начиная с самых низких частот. При частоте среза 700 Гц, когда разборчивость падает всего на 1%, качество снижается от 0 до —1,5 (практически на 30%); при частоте среза ниже 2000 Гц разборчивость падает несколько больше, чем на 20%, а качество звучания — примерно на 80% (кривые 3, 6).

Известно [1], что частота около 2000 Гц разделяет частотный диапазон на две части, содержащие по 50% формантной разборчивости. Для слоговой разборчивости эта граница (точка пересечения кривых для S % на рис. 1.1) соответствует снижению разборчивости на 21% при ограничении частот как снизу, так и сверху. При интегральной оценке кривые 2, 5 пересекаются на частоте около 1700 Гц, где интегральная оценка равна —1,5. На частоте 2000 Гц интегральная оценка при срезании ВЧ составляет —1,2, а при срезании НЧ падает до —2,3. Это также указывает на то, что натуральность передаваемой речи определяется частотами, лежащими ниже 2000 Гц.

На качество звучания меньше влияет одновременное сокращение частотного диапазона сверху и снизу, чем одностороннее сокращение. Ограничение только нижних частот приводит к преобладанию ВЧ составляющих; звук приобретает резкий металлический тембр. Преобладание низких частот придает звуку глуховатость.

Для электроакустических преобразователей, применяемых в телефонной связи, в настоящее время принята полоса частот 300—3400 Гц, содержащая 16 полос равной разборчивости, что при отсутствии потерь, помех и искажений могло бы обеспечить формантную разборчивость $\Sigma A = 5 \times 16 = 80\%$ и слоговую разборчивость $S = 98\%$. Из-за потерь в электроакустических и электрических звеньях тракта и наличия акустических и линейных электрических помех разборчивость падает иногда до величин, ниже предельно допустимых. Верхняя граница передаваемого диапазона частот лимитируется, кроме того, помехами, из-за которых повышение эффективности в ряде случаев нецелесообразно, а иногда даже недопустимо (см. гл. 2).

Для высококачественной передачи речи и музыки требуется широкая полоса частот. Субъективно статистическая экспертиза показала, что при передаче в полосе частот от 30 до 15 000 Гц 80% экспертов не замечают разницы в звучании по сравнению с натуральным [7]. Такая передача соответствует высшему классу качества. Для второго класса допускается сужение полосы до 100—6000 Гц, для третьего — до 200—4000 Гц.

1.2. ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Частотная характеристика может быть представлена как зависимость величины сигнала на выходе устройства от частоты при постоянной для всех частот величине входного синусоидального сигнала.

Эффективность электроакустических преобразователей (микрофонов и телефонов) лимитируется рядом причин физического и технического характера. При заданной ограниченной мощности устройства возникает вопрос о наиболее целесообразном распределении ее по частотному диапазону. При решении этой задачи следует учитывать информативность различных участков частот-

ного диапазона. Частотный спектр формант имеет максимум в области частот 300—900 Гц.

Значение участков частотного спектра речи для разборчивости приема определяется относительным содержанием формант в полосах частот шириной 100 Гц. Частотная зависимость $\Delta A_{100} = \varphi(f)$, называемая формантным распределением в дифференциальной форме, представлена на рис. 1.2. Область наибольшей плотности

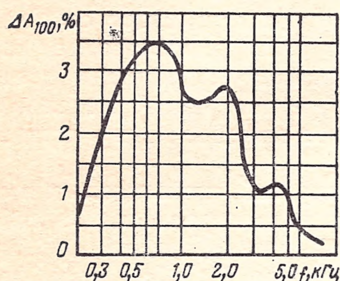


Рис. 1.2. Формантное распределение в дифференциальной форме

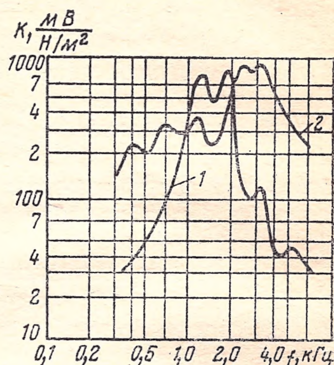


Рис. 1.3. Частотные характеристики угольных микрофонов:
1 — МК-10; *2* — МК-16

формант находится в диапазоне частот 500—900 Гц. Второй, меньший по величине участок уплотнения, находится на частотах, прилегающих к 2000 Гц, и третий, очень слабо выраженный участок, — на частотах около 4300 Гц.

Угольные микрофоны старых образцов имеют частотные характеристики коэффициента передачи *K* резонансного типа. Например, угольный микрофон типа МК-10 имеет два резонансных пика, охватывающих узкую область частот — примерно от 900 до 2500 Гц. Значительная часть наиболее информативной области речи не воспроизводится этим микрофоном (рис. 1.3).

Представляет интерес вопрос о сравнительных преимуществах равномерных и пикообразных характеристик. В области прямолинейного участка кривой, определяющей зависимость формантной разборчивости от уровня ощущения [1], при одинаковых суммарных уровнях пикообразного и сплошного спектров разницы в величинах разборчивости между ними не должно быть, если не принимать во внимание неравномерность плотности распределения формант и положить, что в пределах частотного диапазона она одинакова. Элементарные расчеты показывают, что и на краях кривой вероятности восприятия, где пропорциональность между уровнем ощущения и формантной разборчивостью нарушается, отдельные пики и провалы в частотной характеристике не

влияют сколь-либо существенно на величину разборчивости речи. Опыт показывает, что при ярко выраженной пикообразности характеристики, когда вся мощность сосредоточена в одном-двух пиках, иногда обеспечиваются некоторые преимущества в области уровней ощущения, близких к пределу слышимости. Эти преимущества улавливаются в основном при определении предельной дальности телефонирования. В этом случае пикообразная характеристика обеспечивает иногда некоторую, правда очень незначительную, разборчивость, в то время как по тракту с равномерной характеристикой уже ничего не слышно.

Проведенные исследования [43] не установили какую-либо закономерность зависимости субъективной оценки качества передачи речи от формы частотной характеристики. Испытания проводились при уровне шума 60 дБ и ширине полосы пропускания 300—3400 Гц. Характеристики имели пики и провалы с перепадом до 15 дБ, которые накладывались на равномерную характеристику или на характеристику, имеющую плавные перепады в 6 и 12 дБ. Измерения производились по «методу мнений» при трех значениях эквивалента затухания +40; +22; —4,5 дБ, соответствующих недостаточной, нормальной и чрезмерной громкости.

В высококачественных трактах широковещания влияние неравномерности частотной характеристики сказывается на качестве передачи более заметным образом. Слушатели (эксперты) отмечают искажения звучания и при монотонном спаде частототной характеристики, и при резких пиках и провалах [7], особенно, если неравномерности расположены по краям воспроизводимого диапазона частот. Неравномерность характеристики в виде непрерывной комбинации пиков и провалов менее заметна, чем единичные пики и провалы. Частотные искажения воспринимаются на слух как изменения тембра звучания и обнаруживаются в основном методом сравнения искаженной передачи с неискаженной.

Форма частотной характеристики обычно задается с учетом влияния помех и затухания линии для наиболее типичных или наиболее тяжелых условий (см. гл. 2).

1.3. ДИНАМИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН

Уровни звуков, которые способно услышать ухо человека, охватывают диапазон от 0 до 125—130 дБ, а динамический диапазон речи с учетом среднестатистического распределения уровней речи при ее заданном среднем уровне, разброса громкости различных голосов вверх и вниз от среднего значения, возможного форсирования речи при работе в шумах достигает 110 дБ. В качестве нижней границы динамического диапазона принят порог слышимости в тишине.

Передача речи в таком широком динамическом диапазоне не целесообразна. Во-первых, этот диапазон может быть значительно сокращен без ущерба, а иногда и с выгодой для разборчивости речи, а во-вторых, передача его связана со значительными

затратами мощности, обусловленными передачей максимальных величин сигналов. Динамический диапазон D сигнала, его средняя $W_{\text{ср}}$ и максимальная $W_{\text{макс}}$ мощности связаны между собой строго определенной зависимостью. Для сигнала, подчиняющегося нормальному закону распределения, эта зависимость может быть выражена соотношением [7]

$$W_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{макс}}}{0,115\,D - 0,0004\,D^2}. \qquad (1.1)$$

Если принять $D=40$ дБ, то средняя мощность на выходе $W_{\text{ср}} = 0{,}02 W_{\text{макс}}$, т. е. составляет всего 2% от максимальной. Ограничение передаваемого динамического диапазона сверху является задачей большой актуальности, так как избыточность ухудшает экономические показатели. Это особенно важно для НЧ телефонных трактов, где лимитирующее влияние источников питания проявляется более заметно, чем в других областях техники связи.

Самые слабые уровни речи, лежащие на пороге слышимости и определяющие нижнюю границу динамического диапазона, достигают уха слушающего только в идеальных условиях (при непосредственном разговоре и в полной тишине). Зависимость слоговой разборчивости от суммарного уровня принимаемой речи приведена на рис. 1.4. С повышением уровня разборчивость растет, при этом в пределах уровней речи 50—70 дБ прирост слоговой разборчивости составляет 30% на каждые 10 дБ повышения уровня. Далее рост разборчивости замедляется и при уровне принимаемой речи примерно 97—98 дБ разборчивость достигает максимальной величины 100%, после чего начинает падать.

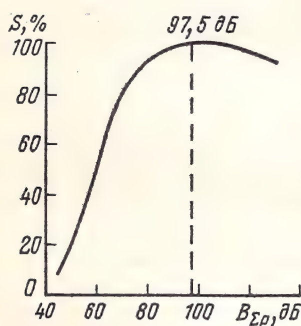


Рис. 1.4. Зависимость слоговой разборчивости речи S от суммарного уровня речи $B_{\Sigma\text{р}}$ при неограниченном спектре и отсутствии помех

Помехи акустические и электрические, которые в условиях эксплуатации практически всегда имеют место, сокращают передаваемый трактом динамический диапазон на величину маскировки, равную в подавляющем большинстве случаев уровню шума.

На рис. 1.5 и 1.6 приведены соответственно зависимости слоговой разборчивости речи для английского языка от ее суммарного уровня на приемном конце в условиях окружающего шума равномерного спектра при полосе частот 125—5700 Гц и для русского языка при полосе частот 200—3000 Гц. Зависимости носят сходный характер, но во втором случае кривые идут более полого. Расхождения объясняются разницей в ширине полос, а также особенностями языка.

Из рисунков следует, что при уровне шума до 80 дБ для достижения нижней границы качества, например «отлично» ($S=$

=80%), требуется превышение уровня речи над уровнем шума порядка 20 дБ как для английского, так и для русского языка. Разборчивость близка к срыву связи ($S=20—25\%$) в случае передачи речи на английском языке при отношении сигнал/помеха, равном приблизительно единице, что при ширине динамического диапазона 47 дБ соответствует сокращению его на 35 дБ. Как показали опыты, разборчивость речи в случае передачи на русском языке при отношении сигнал/помеха, равном —12 дБ, не падала

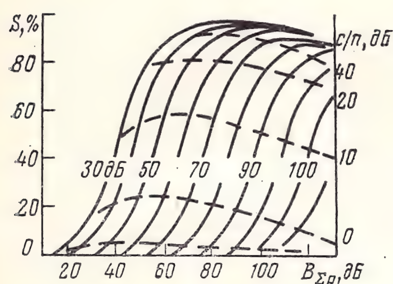


Рис. 1.5. Зависимость слоговой разборчивости речи S от суммарного уровня речи $B_{\Sigma p}$ при различных уровнях шума (параметр кривых) для английской речи B

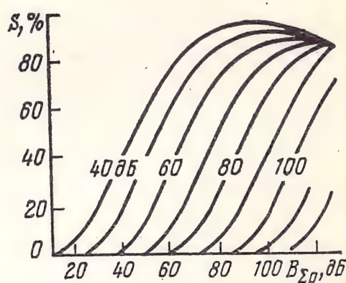


Рис. 1.6. Зависимость слоговой разборчивости речи S от суммарного уровня речи $B_{\Sigma p}$ при различных уровнях шума (параметр кривых) для русской речи

до 0, а составляла 10—15% при уровне шума 50 дБ. Это можно объяснить тем, что составляющие шума, лежащие за пределами полосы частот, повышают суммарный уровень шума, но не влияют на разборчивость, что особенно заметно при узком спектре сигнала. Кривые, изображенные на рис. 1.5 и 1.6, позволяют заключить, что отношения между суммарными уровнями речи и шума не связаны однозначно с разборчивостью речи. В зависимости от уровня шума и ширины полосы частот эти соотношения могут изменяться.

Действие линейных электрических помех аналогично действию акустических шумов. Маскируя наиболее слабые составляющие речи, они сужают динамический диапазон снизу и снижают разборчивость. Зависимости снижения перекрываемого затухания Δa, а также слоговой разборчивости ΔS от псофометрической величины ЭДС электрических помех на зажимах линии [6, 9] приведены на рис. 1.7 и 1.8.

Потери дальности передачи при 1 мВ псоф составляют 10 дБ; потери слоговой разборчивости при том же напряжении электрических помех и акустическом шуме 60 дБ — около 10%, а при уровне шума 50 дБ — около 18%. На сокращение динамического диапазона снизу кроме помех влияют потери в различных элементах тракта. К их числу в телефонном тракте относятся:

1. Акустическое затухание между ртом и микрофоном, зависящее от расстояния между ними. В современных микротелефонных трубках это расстояние снижено до минимально допустимой величины, обусловленной среднестатистическими размерами человеческих голов (линейные и угловые размеры на участке ухо—рот). В зависимости от индивидуальных особенностей этих размеров для отдельных людей расстояние рот—микрофон может изменять-

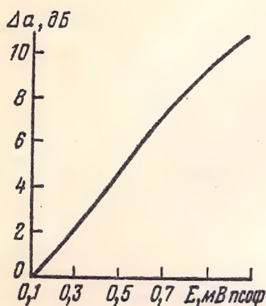


Рис. 1.7. Зависимость снижения перекрываемого затухания Δa от ЭДС электрических помех

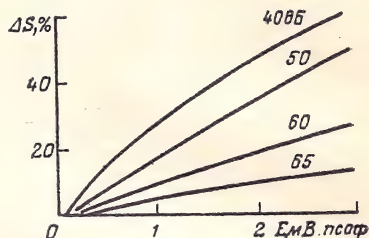


Рис. 1.8. Зависимость снижения слоговой разборчивости ΔS от ЭДС электрических помех при различных уровнях акустического шума

ся в пределах 1—3 см. При громкоговорящей связи акустическое затухание на этом участке тракта значительно больше, чем в случае пользования микротелефоном и изменяется в более широких пределах. В громкоговорящих ТА приходится считаться также с акустическим затуханием на участке громкоговоритель—ухо человека [17].

2. Потери в электроакустических преобразователях — микрофоне и телефоне, оцениваемые величиной коэффициентов передачи и приема.

3. Затухание схем оконечных телефонных аппаратов на передачу и прием.

4. Затухание линейной части тракта, включая мосты питания.

Потери в линии в зависимости от ее длины изменяются в широких пределах. Для телефонного тракта они зачастую превышают все другие потери, особенно на верхних и средних частотах. Зависимость звуковой разборчивости D от затухания линии $a_л$ (без искажений) для эталонной системы, эквивалентной по своим характеристикам связи по воздуху на расстоянии 1 м, приведена на рис. 1.9 [8]. Как видно, в пределах затуханий линии от 0 до 26 дБ разборчивость остается постоянной; далее она падает, сначала медленно, затем ($\sim$35 дБ) все более круто. При затухании линии около 43 дБ разборчивость снижается до нижней границы оценки «удовлетворительно». На действительных линиях,

затухание которых увеличивается с ростом частоты, зависимость разборчивости от $a_л$ еще больше.

Зависимость качества передачи, оцениваемого по пятибалльной системе, от затухания соединительной линии $a_{сл}$ при або-

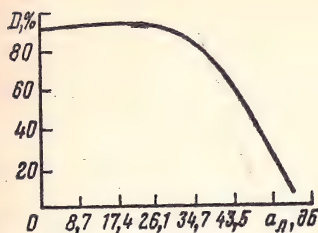


Рис. 1.9. Зависимость звуковой разборчивости D от затухания линии $a_л$ для эталонной системы

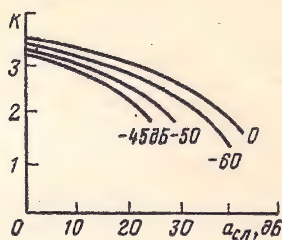


Рис. 1.10. Зависимость оценки качества K от затухания соединительной линии $a_{сл}$ при различных уровнях шума (параметр кривых)

нентских линиях с затуханием 8,69 дБ и различных уровнях электрических помех в цепи приведена на рис. 1.10 [10, 9]. Влияние помех особенно заметно на линиях с большим затуханием, где уровень сигнала низок.

1.4. ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ТРАКТА

Помехозащищенность оценивается обычно по величине разборчивости речи, обеспечиваемой трактом. При этом могут быть применены следующие критерии оценки:

величина разборчивости при заданной помехе;

отношение величин разборчивости при наличии и отсутствии помех;

отношение помеха/сигнал, при котором достигается заданная разборчивость.

Все эти критерии могут быть получены, если известна зависимость разборчивости от отношения сигнал/помеха. Эта зависимость для условий непосредственного разговора без потерь и искажений приведена на рис. 1.11, где верхняя граница соответствует уровню помех 40 дБ, нижняя — 90 дБ.

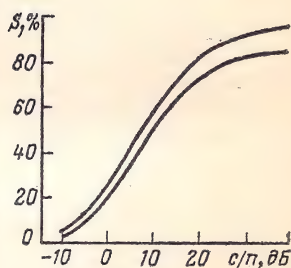


Рис. 1.11. Зависимость слоговой разборчивости S от отношения сигнал/помеха

Рассмотрим различные факторы, влияющие на отношение сигнал/помеха в существующих телефонных трактах, исключая при этом сложные аппаратурные методы компенсации помех [49, 50, 38, 53] и перенося рассмотрение амплитудно-частотной коррекции в последующие главы.

Снижение уровня помех. Одним из самых эффективных способов защиты ушей человека от шумов является снижение уровня этих шумов. Для уменьшения производственных, уличных (в основном транспортных) и бытовых шумов проводится большая работа, иногда требующая значительных капитальных затрат. С некоторых пор не стало слышно заводских, а затем и автомобильных гудков, старые грохочущие трамваи и грузовики сменились новыми, значительно меньше шумящими, многие трамваи заменены автобусами и троллейбусами; машинный парк заводов пополнился новыми станками и прессами и т. д., при разработке и производстве которых предъявляются требования к их возможной бесшумности. Трудно сравнить цеха, оборудованные новыми ткацкими автоматами, со старыми цехами (глухота являлась профессиональной болезнью ткачих); значительно сократилась радиофикация рынков, площадей.

За последние годы все большее внимание стало уделяться звукоизоляции зданий, что снижает степень проникновения шумов с улицы и из соседних помещений. Значительно меньше стали шуметь бытовые приборы (холодильники, пылесосы, швейные и стиральные машины и т. д.). В результате роста благосостояния населения улучшается обстановка в квартирах, все в больших количествах появляется мягкая мебель, ковры, плотные гардины и т. д., что способствует увеличению среднего коэффициента поглощения и, как следствие, снижению уровня шумов. Все это значительно улучшило условия для телефонной связи и в ряде случаев позволило эффективно применять телефонные аппараты там, где телефонный разговор был практически невозможен. Дальнейшее развитие должно идти по пути создания (возможного на данном уровне развития техники) шумового комфорта во всех сферах деятельности человека и в быту. Серьезным препятствием в борьбе с шумами производственного оборудования является то, что существующие способы этой борьбы связаны с потерей полезной мощности.

Борьба с электрическими помехами в линиях связи ведется в двух направлениях:

1) путем снижения помех в местах их возникновения, в том числе станционных шумов от работы приборов АТС, двигателей, выпрямителей, генераторов, радиостанций и т. д. Основные источники этих помех и способы борьбы с этими помехами описаны в [14]. В целях борьбы с переходными разговорами подлежат ограничению также уровни и спектры речи на выходе телефонного аппарата (входе линии);

2) путем защиты линий связи от наводок, например, со стороны линий электропередачи, передающих радиостанций, соседних цепей [15].

Шумозащищенность микрофона. Единственными звеньями тракта, через которые акустические шумы проникают в тракт связи и к уху человека, являются микрофон и телефон. Шумозащита микрофона сводится к увеличению отношения между воспринимае-

мыми им сигналом и помехой. Это отношение может быть улучшено путем приближения микрофона ко рту. Однако возможности в данном направлении к настоящему времени следует считать практически исчерпанными. Дальнейшее уменьшение длины микротелефонной трубки может привести к тому, что в ряде случаев голова человека не будет помещаться в промежуток между микрофоном и телефоном.

Отношение между речью и шумом может быть существенно (до 15 дБ) улучшено за счет использования микрофонных заглушек, рупоров и т. д., охватывающих рот человека и ограждающих микрофон от шумов. Из-за гигиенических соображений этот способ не нашел широкого распространения, а в телефонной связи в настоящее время не применяется совсем.

Обычный микрофон давления, применяемый в телефонных аппаратах, вместе с микрофонным амбушюром является устройством практически нешумозащищенным. Он обладает только некоторой незначительной направленностью, которая зависит от его размеров. В области нижних частот волны свободно огибают микрофон и он не имеет направленности. В области верхних частот микрофон воспринимает несколько хуже шум, поступающий с тыловой стороны микрофона. В результате на этих частотах звук от всенаправленного источника, каким является шум, воспринимается им хуже чем речь. Это свойство микрофона оценивается обычно величиной шумозащищенности, дБ,

$$\gamma_{ш} = 20 \lg U_{р}/U_{ш}, \tag{1.2}$$

которую можно рассматривать и как затухание шумозащищенности $a_{ш}$. У угольного и электромагнитного микрофонов в микротелефонной трубке обычных размеров шумозащищенность составляет от 0—1 дБ на нижних частотах до 4—5 дБ на верхних частотах. При телефонном разговоре сказывается также влияние на шумозащищенность отражений звука от лица, а также теневое действие головы. Иногда при расчетах разборчивости речи влияние $a_{ш}$ не принимается во внимание [1].

Микрофоны направленного действия находят применение как настольные, в том числе в громкоговорящих телефонных аппаратах. Влияние коэффициента концентрации и индекса направленности этих микрофонов на помехозащищенность тракта ГТС рассмотрено в [17].

В связи с возможностями, которые открываются с применением транзисторных усилителей, в телефонной связи начинают использоваться микрофоны градиента давления, например дифференциальный электромагнитный шумостойкий микрофон типа ДЭМШ. В сочетании с транзисторным усилителем он используется, например, в полевом телефонном аппарате ТА-57 [12, 18], в некоторых типах аппаратуры громкоговорящей связи, различных переговорных устройствах, шлемофонах космонавтов и т. д. Теоретические основы работы микрофонов градиента давления ши-

роко освещены в технической литературе, например в [46, 16, 21—24].

Микрофон типа ДЭМШ является градиентным микрофоном первого порядка. Он состоит из двух кольцевых магнитов, на полюсных надставках которых размещены обмотки, и диафрагмы, расположенной между ними. Действие звукового поля на микрофон определяется разностью звуковых давлений по ту и другую сторону его. Когда микрофон расположен вблизи рта, можно считать, что он находится в поле сферической волны, где амплитуда звукового давления убывает обратно пропорционально расстоянию от центра излучателя. Давления, создаваемые при разговоре на переднюю и заднюю стороны диафрагмы, будут разными. При значительном расстоянии между микрофоном и источником звука, например шума, микрофон находится в поле плоской волны и, когда расстояние между передней и задней стенками микрофона мало в сравнении с длиной волны, можно считать, что давления с обеих сторон его одинаковы. Шумозащищенность микрофона определяется разностью чувствительности его к ближнему и удаленному источникам. Эта разница особенно заметна на нижних частотах. Выше предельной частоты 1300—1500 Гц она близка к нулю, а на отдельных частотах становится даже отрицательной (рис. 1.12). Частотная характеристика ДЭМШ на частотах ниже 1200—1400 Гц имеет подъем около 8 дБ/окт. Микрофон этого типа выгодно применять в условиях помех с преобладанием НЧ составляющих, к которым в условиях эксплуатации телефонных аппаратов относится большинство шумов.

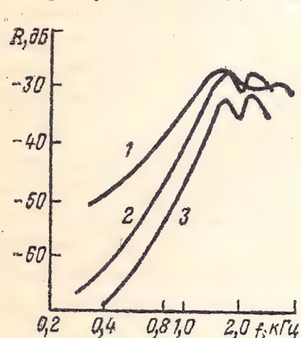


Рис. 1.12. Частотные характеристики коэффициента передачи R микрофона ДЭМШ:

1 — от ближнего источника; *2* — от удаленного источника, расположенного на оси микрофона; *3* — от рассеянного шума, создаваемого удаленным источником

Чувствительность микрофона ДЭМШ небольшая (средняя около 0,2 $\frac{\text{мВ}}{\text{Н/м}^2}$), поэтому он применяется только с усилителем. Обычно микрофон этот располагается близко ко рту, так как в противном случае наряду с шумом будут подавляться и речевые составляющие.

Характеристика направленности микрофона типа ДЭМШ имеет косинусоидальную форму, что в диффузном звуковом поле обеспечивает дополнительную шумозащищенность порядка 4,8 дБ (за счет индекса направленности). При разговоре, когда микрофон находится около рта, характеристика направленности его искажается.

В микрофоне градиента давления наличие геометрической и акустической асимметрии не влияет сколь-либо существенно на величину шумозащищенности. Это облегчает конструирование

градиентных микрофонов с расположением отверстий с одной стороны и использование их в микротелефонных трубках обычного типа. Макеты таких микрофонов (угольного и электромагнитного) обеспечивали такую же шумостойкость, как и двухсторонние. Однако в этом случае ухудшаются характеристики направленности.

Для связи в условиях шума высокого уровня, где шумостойкость микрофона градиента давления первого порядка недостаточна, применяются ларингофоны или микрофоны градиента давления высших порядков. Теоретические и экспериментальные материалы, характеризующие эти микрофоны, изложены, например, в [22]. Микрофон градиента давления второго порядка представляет собой два градиентных микрофона первого порядка, расположенных рядом или друг за другом. Шумозащищенность его на низких частотах равна 26—27 дБ, а частотная область шумозащищенности расширяется до 1500—1600 Гц.

Микрофон градиента давления второго порядка может быть изготовлен из одного микрофона первого порядка, помещенного в середине небольшого корпуса с отверстиями сверху и снизу. Таким образом получается два микрофона первого порядка. Шумостойкость такого микрофона в области нижних частот примерно такая же, как и двойного микрофона, а частотная область шумостойкости расширяется до 2000 Гц.

Наряду с перечисленными выше микрофонами существуют различные специальные типы угольных и электромагнитных микрофонов, например масочные, губные, прикрепляемые к зубам, помещаемые во рту, в ухе (с использованием костной проводимости), прикладываемые к щеке [26] и действующие от колебаний покровов лица через воздушную подушку. В последнем случае достигается довольно высокая шумозащищенность, доходящая на низких частотах до 24 дБ. Микрофон этого типа (щекофон) плохо воспроизводит верхние частоты, а мероприятия по улучшению их восприятия сопровождаются потерей шумозащищенности.

Экспериментами установлено, что угольные микрофоны обладают несколько бо́льшей шумозащищенностью, чем электромагнитные [4]. Это можно объяснить нелинейностью их амплитудных характеристик. Вместе с тем нелинейность угольных микрофонов является причиной амплитудных и частотных искажений. Поэтому наряду с работами по совершенствованию угольных микрофонов [см., например, 5, 25] разрабатываются и внедряются в производство новые типы так называемых линейных микрофонов, свободных от нелинейных искажений. Наиболее перспективными из них являются (электромагнитные, электродинамические, электретные, пьезоэлектрические, ферроэлектрические, полупроводниковые. Основной недостаток их — малая чувствительность, в результате чего они применяются с миниатюрными транзисторными усилителями. Из-за высокой чувствительности и малой стоимости угольного микрофона он применяется уже около

100 лет и очень медленно вытесняется новыми, более совершенными в электроакустическом отношении микрофонами.

Электретный микрофон был предложен еще в 30-х годах, но материалы, позволяющие создать стабильно работающее устройство, были разработаны сравнительно недавно [58—60, 39, 51]. В новых микрофонах мембрана состоит из двух пленок. Одна из них — электрет (на основе тефлона, полиэстера и др.), вторая металлическая. Электретные микрофоны наряду с высоким качеством передачи (широкая полоса частот, большой динамический диапазон, линейность) могут обеспечивать высокую шумозащищенность. Так, например, микрофон типа МИ-510 позволяет получить отношение сигнал/шум до 50 дБ.

Пьезоэлектрические микрофоны начали применяться также после того, как температуро- и влагонеустойчивые пьезоэлектрики (например, сегнетову соль) удалось заменить существенно более стойкими высокополимерными материалами.

Исследователи и разработчики не оставляют также попыток заменить в микрофонах угольный порошок из отжженного антрацита порошком из других материалов (например, из сплава селена и теллурия с добавкой сурьмы). Удалось получить достаточно высокую стабильность, а также и выходную мощность, малые нелинейные искажения, малый гистерезис по току и давлению.

Ларингофон. Ларингофон работает под влиянием механических колебаний покровов горла при разговоре. Его отдача при этом зависит не от звукового давления, а от колебательной скорости, действующей на весь преобразователь. Спектр излучения гортани, значительно беднее ВЧ составляющими, чем спектр, излучаемый ртом человека. Высокие частоты передаются ларингофоном также несколько хуже, чем микрофоном. Поэтому разборчивость речи при использовании ларингофонов ниже. Однако ларингофоны обладают высокой шумозащищенностью (особенно в области нижних частот), которая определяется как отношение его чувствительности при механическом воздействии к чувствительности при акустическом воздействии. Возбуждающие колебания речи он получает от гортани, шумы воздействуют на него через корпус и он реагирует только на очень сильные шумы, а потому может обеспечить передачу речи при уровнях шума до 120 дБ. Абсолютная шумозащищенность ларингофона определяется отношением его чувствительности на гортани и чувствительности в свободном звуковом поле. На частотах до 1000 Гц она доходит до 26—30 дБ, а затем резко падает.

Шумы воздействуют на ларингофон частично и через колебания гортани; это в какой-то степени компенсирует и дополнительно снижает влияние шумов. В целях компенсации иногда последовательно включают второй так называемый компенсационный ларингофон с идентичными первому характеристиками, который располагают поблизости (но не на гортани) на расстоянии половины минимальной для данного диапазона частот длины волны. Это позволяет повысить шумозащищенность, но главным образом

в области нижних частот. На верхних частотах увеличения шумозащищенности (до 12 дБ) можно достигнуть с помощью ларингофонных заглушек. Недостатком ларингофона является неудобство в пользовании из-за необходимости прикреплять его к шее.

Шумозащищенность телефона. Для защиты уха человека от действия акустического шума на приемном конце служат телефонные заглушки. Проникновение шума через заглушки происходит преимущественно через щели, а также вследствие колебаний всей системы вместе с участками головы, обычно действующей как фильтр нижних частот. При неплотном прижатии заглушки к уху щель является основным путем для проникновения помех к уху. Ушные раковины микротелефонных трубок не приспособлены для плотного (без щелей) прижатия к уху. Поэтому стремятся придать им такую конфигурацию, при которой утечка была бы по возможности минимальной (особенно в условиях шума повышенного уровня, когда абонент постарается прижать телефон к уху), а резонанс объема воздуха под заглушкой не слишком сильно снижал их защитные свойства. Эти защитные свойства в области частот до 800—1000 Гц обычно близки к нулю; они обеспечиваются в какой-то мере только в верхней части диапазона частот (рис. 1.13).

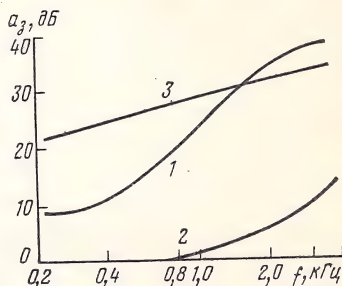


Рис. 1.13. Шумозаглушение телефонных заглушек:

1 — с заполнителем из морских водорослей; 2 — слуховая раковина микротелефонной трубки; 3 — с вязким заполнителем

Для наушников применяются мягкие заглушки из губчатой резины или резиновые пустотелые, дающие бо́льшее заглушение, чем губчатые. При плотном прижатии такой заглушки пружиной к уху снижаются ощущение неудобства и утомляемость по сравнению с твердой заглушкой. Значительной шумозащищенностью и вместе с тем неплохой частотной характеристикой обладают малогабаритные телефоны, снабженные звукопроводящей трубкой с втулкой, вставляемой в ухо.

Для работы в шумах повышенного уровня применяются заглушки с различными заполнителями, а при еще более высоких уровнях шумов дополнительно шлемофоны. Наиболее эффективными оказались заглушки с вязким жидким заполнителем, снижающие уровень шума в области нижних частот примерно на 20 дБ, а на высоких частотах до 30—40 дБ. Такие заглушки наряду с плотным прилеганием к уху обеспечивают также значительное затухание шумов, проникающих внутрь через кожух заглушки.

1.5. МЕСТНЫЙ ЭФФЕКТ И ЕГО ВЛИЯНИЕ

Под местным эффектом в общем виде понимают акустико-электрическую связь между микрофоном и телефоном аппарата,

включенного в линию. Влияние местного эффекта на телефонную связь выражается в следующем:

акустический шум приемного помещения воспринимается микрофоном и, пройдя через схему аппарата на телефон, создает помехи приему речи;

собственный разговор прослушивается через цепь местного эффекта в телефоне и также в какой-то мере мешает приему;

через замкнутую цепь «микрофон—схема аппарата—телефон—микрофон» при некоторых условиях может возникнуть самовозбуждение аппарата.

Местный эффект является одним из препятствий на пути создания громкоговорящего телефонного аппарата, управляемого от голоса [17].

Для борьбы с местным эффектом в современных телефонных аппаратах применяются так называемые противоместные схемы, задачей которых является внесение затухания в цепь, соединяю-

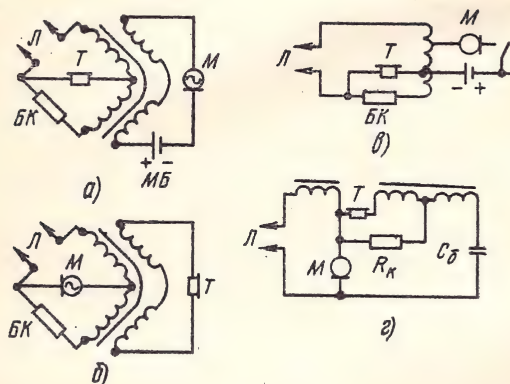


Рис. 1.14 Противоместные схемы:
мостовые трансформаторные схемы — а) МБ, б) ЦБ; компенсационные автотрансформаторные схемы—в) МБ, г) ЦБ

щую микрофон с телефоном. Подавление токов местного эффекта обычно осуществляется двумя способами (рис. 1.14). В мостовой противоместной схеме (рис. 1.14*а*) телефон включается в диагональ моста переменного тока, одним из уравновешиваемых плеч которого является входное сопротивление линии $Z_л$, а другим балансный контур, параметры которого подбираются подобными $Z_л$. Когда мост уравновешен, ток в телефоне, создаваемый возбужденным звуковыми колебаниями микрофоном, равен нулю. В компенсационной противоместной схеме (рис. 1.14*б*) линия, микрофон, телефон и компенсационный контур (также эквивалентный $Z_л$) включаются между секциями автотрансформатора таким образом, чтобы падение напряжения, создаваемое микрофоном на

зажимах телефона, компенсировалось падением напряжения, создаваемого здесь компенсационной обмоткой.

Рассмотрим влияние местного эффекта на работу телефонного аппарата в указанных выше четырех случаях.

Шумы местного эффекта. Влияние шума местного эффекта, как и всякой другой помехи, на телефонный разговор проявляется в маскировке речевых сигналов, в результате чего разборчивость и перекрываемое затухание снижаются. Зависимости предельного затухания линии $a_л$ от уровня интенсивности шума $B_ш$ в месте приема для аппарата с местным эффектом и без него приведены на рис. 1.15 [11]. Чем выше уровень шума, тем больше снижение перекрываемого затухания от местного эффекта. Например, при уровне шума 70 дБ перекрываемое затухание снижается приблизительно с 50 до 20 дБ.

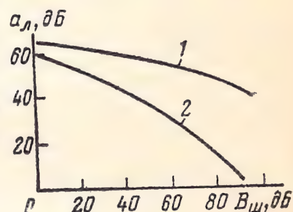


Рис. 1.15. Зависимость предельно-перекрываемого затухания линии $a_л$ от уровня шума $B_ш$ в месте приема:

1 — без местного эффекта; 2 — с местным эффектом

В результате измерений слоговой разборчивости аппаратов с угольными микрофонами, включенных через искусственную линию с затуханием 43 дБ (для частоты 1000 Гц), при уровне шума на приеме 75 дБ получены следующие данные [11]. Макеты аппаратов с телефонами резонансного типа обеспечивали слоговую разборчивость, равную 63,6% при полном отсутствии местного эффекта и 42,5% с местным эффектом. При использовании широкополосных телефонов слоговая разборчивость была равна соответственно 74,6 и 49%. Как видно, влияние местного эффекта довольно значительно.

Используя противоместные схемы, влияние местного эффекта иногда удается значительно снизить. К числу элементов, входящих в цепь местного эффекта и способных повлиять на ее затухание по отношению к акустическим шумам, принадлежит микрофон. Применение шумостойких микрофонов является одним из эффективных средств борьбы с шумами местного эффекта.

Прослушивание собственного разговора в телефоне. Мешающее действие прослушивания собственного разговора в телефоне на прием приходящих из линии речевых сигналов можно объяснить явлением предмаскировки [35] этих сигналов собственной речью в момент перехода с передачи на прием. Предмаскировка особенно заметна, когда уровень маскирующего звука существенно выше маскируемого, т. е. при большом местном эффекте и плохой слышимости принимаемой речи. В этих условиях проявляются защитные свойства уха. Во избежание перегрузки оно снижает чувствительность во время громкого прослушивания собственной речи, адаптируется к этой громкости. Когда же абонент переходит с передачи на прием, ухо начинает повышать свою чувствительность, адаптироваться к более слабому сигналу. Однако в силу некоторой инерционности оно не успевает сделать это сразу. В ре-

зультате начальные звуки, а иногда и слова принимаемой речи могут быть потеряны. Возникают переспросы, свободный беглый разговор с возможностью перебоя говорящего затрудняется.

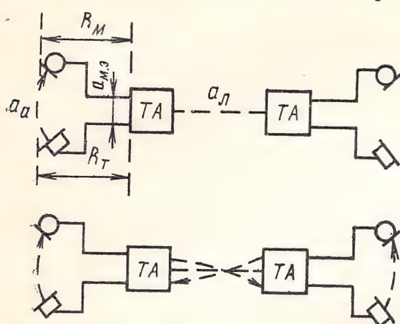


Рис. 1.16. Схема с обратной связью

Громкое прослушивание собственной речи в телефоне раздражает и утомляет. Поэтому при сильном местном эффекте абонент иногда отодвигает микротелефонную трубку от уха, ухудшая этим как прием, так и передачу. Кроме того, при сильном местном эффекте абонент непроизвольно снижает громкость собственной передачи. Так, например, если уровень собственной речи в телефоне ниже уровня ее перед микрофоном на 10 дБ, это снижение доходит до 12 дБ, а при равенстве уровней — примерно 6 дБ. Однако при полном отсутствии местного эффекта создается впечатление, что аппарат неисправный («мертвый»). Кроме того, наличие местного эффекта позволяет по шороху в собственном телефоне при продувании микрофона легко проверить функционирование разговорных цепей телефонного аппарата.

Самовозбуждение. Известно, что для исключения возникновения самовозбуждения необходимо, чтобы сумма затуханий и усилений в замкнутой цепи обратной связи была не больше нуля. Применительно к телефонному аппарату это означает (рис. 1.16*а*):

$$a_а + a_{м.э} + R_м + R_т + H_с, \leqslant 0. \qquad (1.3)$$

Здесь $a_а$ — акустическое затухание между передатчиком (телефоном, громкоговорителем) и приемником (микрофоном); $a_{м.э}$—рабочее затухание цепи местного эффекта; $R_м$, $R_т$ — коэффициенты передачи микрофона и телефона; $H_с$ — запас устойчивости к самовозбуждению. Самовозбуждение может быть обусловлено также механической связью между телефоном и микрофоном [55].

Явления самовозбуждения особенно проявляются в громкоговорящих телефонных аппаратах, где $R_м$ и $R_т$ велики, но иногда наблюдаются и в обычных телефонных аппаратах. При увеличении чувствительности микрофона и телефона до некоторого критического значения цепь теряет устойчивость и переходит в режим генерации. Однако даже при значениях $R_м$ и $R_т$ ниже критических, когда самовозбуждение еще не возникает, передача может оказаться качественно неудовлетворительной из-за специфических искажений, которые принято называть регенеративными [21, 28, 29].

Величина запаса устойчивости $H_с$ должна учитывать регенеративные искажения (около 6 дБ) и опасность возникновения стоя-

чих волн для помещений с значительным преобладанием отраженного звука (порядка 6 дБ).

При малом затухании линии самовозбуждение может возникнуть через линию и акустические участки двух оконечных аппаратов (рис. 1.16*б*). В телефонных аппаратах самовозбуждение обычно возникает в промежуток времени с момента включения микрофона (снятия трубки с рычага) до поднесения ее к уху, когда цепь самовозбуждения прерывается из-за внесения в нее большого затухания на участке между микрофоном и телефоном, обусловленного наличием здесь головы человека. Свист, обусловленный самовозбуждением, при этом прекращается, но он все же является крайне неприятным, а потому должен быть исключен.

Местный эффект в громкоговорящих ТА. В громкоговорящих телефонных аппаратах, управляемых голосом, самовозбуждение делает всю схему практически неработоспособной. Основной отличительной особенностью громкоговорящих ТА является замена микротелефонной трубки на громкоговоритель и микрофон, устанавливаемые на некотором расстоянии от абонента, что позволяет освободить руки во время разговора по телефону. В сравнении с обычным ТА тракт приемопередачи громкоговорящего ТА содержит два дополнительных акустических затухания на участках рот — микрофон и громкоговоритель — уши человека. Поэтому требуется значительное повышение общего коэффициента приемопередачи в сравнении с обычным ТА, что достигается применением усилителей. В результате увеличивается опасность самовозбуждения, что препятствует повышению эффективности и дальности действия громкоговорящих ТА и сужает область их применения.

На практике все мероприятия по улучшению противоместных свойств аппарата и увеличению акустического затухания между громкоговорителем и микрофоном не дают достаточного эффекта, позволяющего надежно подавить обратную связь. Поэтому приходится применять управление голосом, которое сводится к внесению затухания в противоположную цепь во время передачи и приема разговора. Возможности таких схем рассмотрены в [17]. Чем больше требуемое усиление, тем больше должно быть затухание, создаваемое речевыми сигналами в неработающей ветви, необходимое для предотвращения самовозбуждения. Но наличие этого затухания затрудняет перебой говорящего и снижает возможности ведения беглого двустороннего разговора.

1.6. ОБ УВЕЛИЧЕНИИ ЗАТУХАНИЯ ЦЕПИ МЕСТНОГО ЭФФЕКТА

Повышение затухания цепи местного эффекта является задачей актуальной. Ее нельзя считать к настоящему времени решенной. Об этом свидетельствует и такой факт, как большой поток различного рода авторских заявок и патентов в этой области, который особенно возрос в связи с возможностями, открываемыми с применением полупроводниковых приборов для повышения коэффициентов передачи и приема, а также для борьбы с местным

эффектом. Рассмотрим некоторые из известных способов повышения затухания цепи местного эффекта, трансформаторных схем.

Противоместная схема в условиях стабильного сопротивления нагрузки может обеспечить высокое затухание $a_{м.э}$, доходящее до 30—35 дБ и более. Усложнение балансного контура позволяет создать как в мостовой, так и в компенсационной схемах достаточное подобие его сопротивления сопротивлению нагрузки аппарата и обеспечить большое затухание цепи местного эффекта в

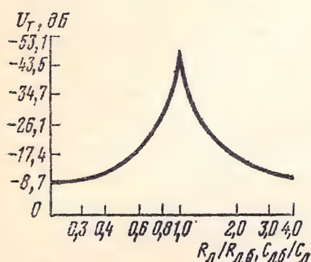


Рис. 1.17. Зависимость напряжения $U_т$ на зажимах телефона от одновременного изменения нагрузочных величин $R_л$ и $C_л$ в сравнении с их расчетными значениями $R_{л.б}$, $C_{л.б}$

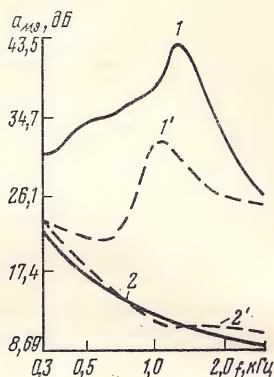


Рис. 1.18. Рабочее затухание местного эффекта:

1′, 1 — при нагрузке на расчетную кабельную линию; 2, 2′ — при нагрузке на воздушную линию; 1, 2 — с четырехэлементным балансным контуром; 1′, 2′ — с двухэлементным балансным контуром

широком диапазоне частот. Однако даже при небольшом изменении нагрузочного сопротивления или при отклонении параметров элементов балансного контура от расчетных значений, например в результате производственного разброса величин R и C, это затухание резко падает, что иллюстрируется экспериментальными кривыми, приведенными на рис. 1.17. Усложнение балансного контура, например, применение четырехэлементного контура вместо двухэлементного дает повышение затухания цепи местного эффекта только при работе на расчетную линию; при переходе с кабеля одного типа на другой $a_{м.э}$ снижается, а при нагрузке на воздушную линию резко падает и становится практически одинаковым для усложненного и простого контуров (рис. 1.18).

Главным критерием при оценке различных схем, предназначенных для подавления местного эффекта, является их устойчивость к изменению сопротивления нагрузки.

Величины входных сопротивлений линий, применяемых в различных сетях телефонной связи, существенно различаются. Модуль волнового сопротивления $Z_л$ малопарного кабеля типа ПРВМТ с диаметром жилы 1,2 мм равен 240 Ом при фазе $\varphi = -40°$; для многопарного кабеля типа ТГ с диаметром жилы

0,5 мм $Z_л=870$ Ом при $\varphi=-44°$; воздушная линия (стальная) диаметром 3 мм имеет $Z_л=1600-1800$ Ом при $\varphi=+22°$ [30]. Поэтому создать единый балансный контур, который обеспечивал бы высокое $a_{м.э}$ на всех этих линиях, невозможно. Простейшим техническим решением в этом случае является применение секционного балансного контура, рассчитанного на работу по различным линиям, как это сделано, например, в отечественных телефонных аппаратах ТАУ-3 и ТАУ-4 с усилителями передачи и приема. Такой способ эффективен в сетях с однотипными линиями. Но и здесь баланс схемы может нарушаться, например, при связи с абонентами сетей, оборудованных кабелями другого типа, или при связи через другую соединительную линию, а также в случае работы на коротких линиях, когда нагрузкой является входное сопротивление аппарата второго абонента.

Затухание местного эффекта определяется степенью согласованности между сопротивлениями балансного контура $Z_{б.к}$, линии $Z_л$ и аппарата $Z_а$. Улучшить это согласование можно, воздействуя на входное сопротивление аппарата или на нагрузку его со стороны линии, как это сделано во французском аппарате С63 [8], где на входе аппарата включен контур *RC*, позволяющий регулировать ток питания и изменять степень балансировки при установке на линии. В современных телефонных аппаратах системы ЦБ для уменьшения местного эффекта широко используется автоматическое снижение коэффициентов передачи и приема, а также изменения входного сопротивления аппарата $Z_а$ и сопротивления балансного контура $Z_{б.к}$ с помощью полупроводниковых элементов, управляемых линейным током питания. В американских аппаратах типа Белл-500, 701, 706 [31, 8, 9], шведском аппарате Dialog [32, 8] и австралийском аппарате типа 801 [34] для этой цели используются варисторы в сочетании с *RC* контурами, а в английском аппарате типа 7А — селеновые вентили [33, 8]. С уменьшением длины линии ток питания аппарата увеличивается, в результате чего сопротивление варисторов переменному току уменьшается и они, в зависимости от величины постоянного тока, в большей или меньшей степени шунтируют соответствующие элементы разговорной схемы. При этом уменьшаются коэффициенты передачи и приема, изменяются сопротивления $Z_а$ и $Z_{б.к}$, в результате чего на вход аппарата и в балансный контур включаются дополнительные элементы *RC*. Устройства рассматриваемого типа, реагируя на величину тока питания, учитывают только свойства ближайшей абонентской линии. В случае, если эта линия короткая, а тракт в целом имеет большое затухание, эффект от их действия может быть отрицательным. Они не могут также применяться в аппаратах системы МБ, где линейный ток питания отсутствует.

Вопросы повышения эффективности дифференциальной схемы с помощью диодных мостов рассмотрены в ряде работ, например в [13]. Возможности улучшения балансировки этих схем в пределах линейных соотношений можно признать хорошо изу-

ченными и малообещающими. Рабочие затухания схемы на прием, передачу и противоместность определяются следующими выражениями [37, 4]:

$$a_{пр} = a_{0\,пр} + \ln\left|\frac{Z_а/Z_{л.б} + Z_л/Z_{л.б}}{1 + Z_а/Z_{л.б}} \sqrt{Z_{л.б}/Z_л}\right|, \quad (1.4)$$

$$a_{пер} = a_{0\,пер} + \ln\left|\frac{Z_а/Z_{л.б} + Z_л/Z_{л.б}}{1 + Z_а/Z_{л.б}} \sqrt{Z_{л.б}/Z_л}\right|, \quad (1.5)$$

$$a_{м.э} = a_{0\,пр} + a_{0\,пер} + \ln\left|\frac{Z_а/Z_{л.б} + Z_л/Z_{л.б}}{1 + Z_а/Z_{л.б}} \sqrt{Z_{л.б}/Z_л}\right| + \ln\left|\frac{1 - Z_л/Z_{л.б}}{2\sqrt{Z_л/Z_{л.б}}}\right|, \quad (1.6)$$

где $Z_л$, $Z_а$ — входные сопротивления линии и аппарата; $Z_{л.б}$ — входное сопротивление линии, на которое рассчитан балансный контур; $a_{0пр}$, $a_{0пер}$ — рабочие затухания схемы на прием и передачу при $Z_л = Z_{л.б}$.

Изменение $a_{м.э}$ под влиянием рассогласования определяется величиной $\Delta a_{м.э} = \Delta a_{м.э1} + \Delta a_{м.э2}$, выражаемой двумя последними слагаемыми ур-ния (1.6). При этом под воздействием $\Delta a_{м.э1}$, как видно из (1.4) и (1.5), наряду с затуханием местного эффекта увеличиваются также затухания на прием и передачу.

В условиях, когда шумы местного эффекта преобладают над всеми другими шумами, уровень ощущения речи E определяется соотношением

$$E = B_{р.пр} - B_{м.э} = (B_{р.м} + R_м - a_{пер} + R_т - a_{пр} - a_л) - (B_{а.м} + R_м - a_{м.э} + R_т), \quad (1.7)$$

где $B_{р.пр}$ — уровень речи на приеме (в ухе слушающего); $B_{м.э}$ — уровень сигнала местного эффекта на приеме; $B_{р.м}$ — уровень речи на микрофоне; $B_{а.м}$ — уровень акустического шума на микрофоне.

С учетом (1.4) и (1.6)

$$E = (B_{р.м} - B_{а.м} - a_л) + (\Delta a_{м.э2} - a_{м.э1}). \quad (1.8$$

Таким образом, влияние рассогласования между $Z_а$, $Z_л$, $Z_{л.б}$ на изменение уровня ощущения речи в условиях преобладания шумов от местного эффекта определяется разностью $\Delta E = \Delta a_{м.э2} - \Delta a_{м.э1}$. Величина $\Delta a_{м.э1}$, уменьшающая уровень ощущения, зависит от соотношения между $Z_л$, $Z_а$, $Z_{л.б}$, а величина $\Delta a_{м.э2}$, увеличивающая уровень ощущения, только от $Z_л/Z_{л.б}$. Результаты расчета $\Delta a_{м.э1}$ и $\Delta a_{м.э2}$ приведены на рис. 1.19. Из него следует, что:

1. Изменение $Z_а$ начинает заметно сказываться на $a_{м.э}$, $a_{пр}$ и $a_{пер}$ только при значительных отклонениях от $Z_{л.б}$. Величина $\Delta a_{м.э1}$ может значительно уменьшиться и даже изменить свой знак при расхождении между $Z_а$ и $Z_{л.б}$, но при этом необходимо соблюдать следующие условия: если $Z_а > Z_{л.б}$, то расчетное входное сопротивление линии следует выбирать на нижнем пределе изменения $Z_л$ в условиях эксплуатации с таким расчетом, чтобы при увели-

чении $Z_л$ соблюдалось условие $Z_л > Z_{л.б}$ и, наоборот, при $Z_а < Z_{л.б}$ величина $Z_{л.б}$ должна быть больше $Z_л$.

2. Зависимость $\Delta a_{м.э2}$ от $|Z_л|/|Z_{л.б}|$ носит экстремальный характер с острым максимумом при $Z_л = Z_{л.б}$. В пределах примерно двукратных изменений $Z_л$ по сравнению с ее расчетной величи-

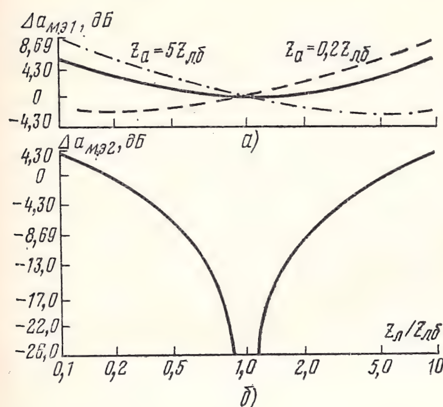


Рис. 1.19 Зависимость $\Delta a_{м.э1}(a)$ и $\Delta_{м.э2}(б)$ от $|Z_л|/|Z_{л.б}|$

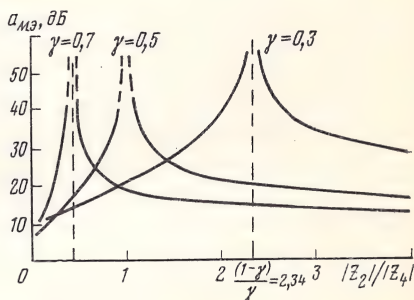


Рис. 1.20. Зависимость затухания местного эффекта от $|Z_2|/|Z_4|$ при различных величинах коэффициента трансформации γ

ной суммарное значение $\Delta a_{м.э} = \Delta a_{м.э2} - \Delta a_{м.э1}$ определяется в основном величиной $\Delta a_{м.э2}$ и таким образом зависит только от $|Z_л|/|Z_{л.б}|$.

Зависимость $\Delta a_{м.э2}$ от величин $Z_л/Z_{л.б}$ при различных значениях коэффициента трансформации γ изучалась в [26]. При этом $\gamma = Z_л/Z_м$ определяет согласование микрофона с линией, а условие баланса выражается уравнением $Z_б = \gamma Z_л/(1-\gamma)$. Расчетные кривые, характеризующие зависимость $\Delta a_{м.э1}$ и $\Delta a_{м.э2}$ от $|Z_л|/|Z_{л.б}|$, воспроизводятся здесь только в части, касающейся рассогласования цепи местного эффекта (рис. 1.20). Из него следует, что чувствительность дифференциальной системы к степени рассогласования, характеризуемая слагаемым $\Delta a_{м.э2}$, может быть несколько снижена за счет уменьшения коэффициента трансформации γ. Согласно этим кривым, например, при увеличении $Z_л$ на 20—50%, по сравнению с его расчетным значением, соответствующим экстремальной величине $a_{м.э}$ и определяемым соотношением $|Z_л|/|Z_{л.б}| = (1-\gamma)/\gamma$, снижение затухания $a_{м.э2}$ в результате расстройки баланса будет при $\gamma = 0{,}3$ на 5—6 дБ меньше, чем при $\gamma = 0{,}5$, принятом в некоторых телефонных аппаратах. (В случае снижения $Z_л$ на ту же величину разница составляет 3—4 дБ.) При этом рабочее затухание приема и передачи увеличивается примерно на 1 дБ [26]. Таким образом, при снижении величины γ с 0,5 на 0,3 увеличение затухания местного эффекта составит все-таки 2—5 дБ.

Возможности использования изменений разговорных токов, происходящих в элементах дифференциальной схемы под влиянием разбалансировки для приведения в действие какого-либо устройства, которое тем или иным способом восстанавливало бы равновесие в схеме (например, воздействием на величину $Z_{б.к}$ или нагрузку аппарата со стороны линии), не снижая при этом существенно коэффициенты приема и передачи, практически исключены. Наиболее значительные изменения при разбалансировке претерпевают токи в телефоне; в других элементах схемы они невелики. Однако, как показали расчеты, области разброса уровней шумов местного эффекта на зажимах телефона перекрываются областью разброса средних уровней принимаемой речи при различных затуханиях линии.

При приеме речи шумы проходят в цепь телефона в паузах речи, когда абонент молчит и слушает второго абонента. Поскольку шумы местного эффекта и речь разделены в этой цепи по времени, а также и по месту (говорящий и слушающий абоненты находятся на разных концах линии), то передаваемая в данный момент речь воздействует на один аппарат, а акустические помехи — на микрофон другого аппарата. Это создает возможности для разделения речи и помехи с помощью нелинейного устройства. Подавление шумов местного эффекта (в паузах речи) может быть осуществлено как простым нижним ограничением, так и путем «вырезания пауз» с помощью пороговых устройств, запирающих противоположную цепь тракта в паузах речи (см. гл. 8). Последнее широко используется в громкоговорящих телефонных аппаратах, управляемых голосом [17], но может быть применено для уменьшения шумов местного эффекта и в обычных телефонных аппаратах.

Уменьшение влияния местного эффекта в полевом телефонном аппарате типа ТА-57 осуществлено посредством нижнего ограничения в цепи передачи [18, 36]. Это было сделано в целях выполнения требования об обеспечении возможно большего перекрываемого затухания. Основным препятствием на этом пути были помехи от местного эффекта, которые ограничивали возможности повышения чувствительности аппарата. Задача осложнялась тем, что аппарат должен был работать в условиях акустических шумов повышенного уровня (75 дБ) как по полевым кабелям, так и по воздушным стальным цепям; при этом различия в волновых сопротивлениях линий достигали четырехкратного значения.

Применение нижнего ограничения на передаче в сочетании с микрофоном градиента давления первого порядка типа ДЭМШ-1 позволило решить эту задачу. Нижнее ограничение осуществлено путем введения в цепь эмиттера второго каскада усилителя передачи комбинированного нелинейного контура. Сопротивление контура изменяется в зависимости от величины сигнала, воспринимаемого микрофоном. При более слабом сигнале (акустический шум) оно меньше, чем при более сильном (речь), соответственно усиление при шуме меньше.

Возможности применения ограничения снизу без ущерба для разборчивости речи рассмотрены в последующих главах. Для уменьшения потерь разборчивости речи порог ограничения в ТА-57 снижается с увеличением частоты. В сетях, где ограничение снизу недопустимо или шумы позволяют обойтись без значительного подавления местного эффекта, нелинейный контур в аппарате ТА-57 может быть зашунтирован резистором (порядка 100 Ом).

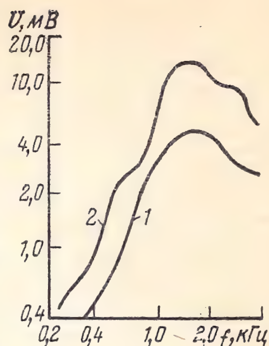


Рис. 1.21. Характеристики уровней шума на зажимах телефона с нижним ограничением (*1*) и без него (*2*)

Влияние ограничения снизу на частотную характеристику помехи, создаваемой на зажимах телефона акустическим шумом приемного помещения (уровень шума 75 дБ), показано на рис. 1.21. Кривая *1* соответствует наличию нижнего ограничения в цепи передачи аппарата, кривая *2* — его отсутствию. Подавление шума местного эффекта составило в рассматриваемом случае около 6 дБ. Это позволило увеличить перекрываемое затухание при работе на согласованную линию примерно на 4,3 дБ и при сильной расстройке цепи баланса — на 6,5—8,7 дБ.

Список литературы

1. **Покровский Н. Б.** Расчет и измерения разборчивости речи. М., «Связь», 1962. 391 с.
2. **Вемян Г. В.** Качество телефонной передачи и его оценка. М., «Связь», 1970. 224 с.
3. **Обоимов А. Я., Украинский А. И.** Повышение балансного затухания дифсистемы. — «Электросвязь», 1977, № 4, с. 60—63.
4. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной телефонной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1950. 254 с.
5. **Gleiss Norman.** Kolmikrofoner och liniara mikrofoner en jamfo relse.—«Tele», 1975, v. 81, N 4.
6. **ИК МККФ,** документ № 27, 1956.
7. **Бабуркин В. И., Гензель Г. С., Павлов Н. Н.** Электроакустика и радиовещание. М., «Связь», 1967.
8. **Губренко И. М., Кучумов Е. В.** Телефонные аппараты АТС. М., «Связь», 1968. 284 с.
9. **Финклер И. Е.** Электроакустические характеристики телефонного тракта. М., Связьиздат, 1961. 130 с.
10. **МККТТ.** Красная книга, т. 1. Женева, 1957.
11. **Кузнецов Е. К.** Телефонные аппараты. М., Связьиздат, 1956. 296 с.
12. **Покровский Н. Б.** Телефония. Теория и техника передачи речи. Л., ВКАС, 1970. 285 с.
13. **Садовский А. С.** Дифференциальная схема с повышенной защищенностью между трактами. — «Электросвязь», 1967, № 6; 1969, № 4; 1971, № 8, с. 70—75.
14. **Лютов С. А.** Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними. М., Госэнергоиздат, 1952.
15. **Калюжный В. Ф., Слапов А. К.** Помехоподавляющие устройства на проводных линиях связи. — «Электросвязь», 1975, № 12, с. 65—67.
16. **Сапожков М. А.** Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., Связьиздат, 1963. 450 с.

17. **Репина О. И.** Громкоговорящая телефонная связь. М., «Связь», 1969. 244 с.
18. **Телефонный** аппарат ТА-57. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
19. **Быков Б. С.** Важнейшие акустические характеристики и артикуляционные таблицы русской речи. М., Оборонгиз, 1950.
20. **Сборник** статей. — «Труды Академии». Л., ВКАС, 1951, № 29—30; 1954, № 40.
21. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960. 320 с.
22. **Feik, Kaszinsky G.** «Hochfrequenztechnick und Elektroak.», 1960, N 69, p. 6.
23. **Smetana C.** «Hochfrequenztechnick und Elektroak.», 1958, N 60, p. 6.
24. **Elitorn, Wiggins.** «Proceeding of the IRE», 1946.
25. **Gleis N.** Carbonmicrophoner and linear microphones.—«Telc. Engl. Ed», 1976, N 28.
26. **Полковский И. М., Ткаченко А. Д.** Акустические тракты с обратной связью. М., «Связь», 1969. 224 с.
27. **Губренко И. М., Коренец Г. Д.** Бестрансформаторные схемы ТА. — Сборник научных трудов ЦНИИС ЛФ, 1971, вып. 4, с. 107—116.
28. **Буйнов А. В.** Характеристики телефонных каналов и качество передачи. М., «Связь», 1959.
29. **Фурдуев В. В.** Предельное усиление звука в закрытых помещениях. — «Акустический журнал», 1965, № 3.
30. **Гумеля А. Н., Шварцман В. О.** Электрические характеристики кабельных и воздушных линий связи. М., «Связь», 1966.
31. **Spenser H. J., Wilson F. A.** The new 700-type table telephone N 706.—«The Post Office El. Eng. J.», 1959, v. 52, Part 1.
32. **Boerd A.** Transmission characteristics of the Dialog.—«Ericsson Review», 1964, v. XLI, N 4.
33. **Engineering** Bulletin фирмы АТЕ, N 528, N 2324, 1960.
34. **Kolbc R. J.** The type 801 telephone.—«The Telecommunication Journal of Australia», v. 13, N 6, 1963.
35. **Цвикер Э., Фельдкеллер Р.** Ухо как приемник информации. М., «Связь», 1971.
36. **Репина О. И.** Пути улучшения характеристик разговорного тракта телефонного аппарата. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1959.
37. **Карагодина И. Л.** Городские и жилищно-коммунальные шумы и борьба с ними. М., «Медицина», 1964.
38. **Пасынков В. В., Савельев Г. А., Чирков Л. К.** Нелинейные полупроводниковые сопротивления. М., Судпромгиз, 1962.
39. **Hedman Jan—Olof.** Elektretmikrophonen-enny mikrophon für teleforni.—«Tele», 1975, v. 81, N 4.
40. **Кучумов В. В., Левитан А. В.** Статическое распределение уровней шумов в служебных кабинетах промышленных предприятий, учреждений и организаций. — «Сборник научных трудов ЦНИИС ЛФ», 1970, вып. 5.
41. **Куля В. И.** Влияние фазовых соотношений в спектре речи. — «Электросвязь», 1970, № 7, с. 59—66.
42. **Чистович Л. А.** О значении временных факторов для восприятия сложных звуков. — «Акустический журнал», 1965, т. II, вып. 3.
43. **Вахрушева Е. Б.** Влияние формы частотной характеристики системы связи на субъективную оценку качества речи при телефонном разговоре. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС, 1970, вып № 5.
44. **Ушаков В. А.** Качественные показатели трактов телефонной связи. ВЗЭИС, М., 1964.
45. **Вахрушева Е. Б.** Критерии субъективной оценки качества передачи речи при телефонном разговоре. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС, 1970, вып. 5.
46. **Иофе В. К.** Об антишумовых свойствах микрофона на градиент давления. — «ЖТФ», 1945, т. 15.
47. **Ohga J., Shirai S., Ochi O.** A high-efficiency granule microphone using Se-Te alloys.—«Proc. IEEE», 1975, v. 63, N 5.
48. **Пууперя А.** Телефонный аппарат с автоматической регулировкой чувствительности. Перевод № 63/73583 (ГТНБ), 1962, № 3.

49. **ГОСТ** 7153—68. Аппараты телефонные общего применения. Методы испытания.
50. **Садовский А. С., Павлова В. И., Вемян Г. В.** Повышение балансного затухания абонентских сетей. — «Электросвязь», 1976, № 11, с. 30—34.
51. **Обзор** электронных пластмасс в «Radio och telev.», 1974. v. 46, N 11.
52. **Быков Ю. С.** Спектральные характеристики русской речи. — «Труды Комиссии по акустике АН СССР», 1953, № 7.
53. **Pollack J.** «JASA», 1952, v. 24, N 5, p. 538—540.
54. **Zazenby M.** «Wireless World», 1957, v. 4, p. 435—440.
55. **Чирва П. К.** К вопросу об устойчивости электроакустического тракта с самопрослушиванием. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС. М., 1975, вып. 6, с. 79.
56. **Чистович Л. А.** Влияние частотных ограничений на разборчивость русских согласных звуков. Доклад на секции Комиссии по акустике АН СССР, 1956, апрель.
57. **Жолдаков И. В.** Определение артикуляции речи канала с ограниченным спектром частот. — «ИЭСТ», 1940, № 12.
58. **Губин А. И., Сканави Г. И.** Получение и свойства электретов из неорганических диэлектриков. — «Известия АН СССР», серия физическая, 1958, т. 2, № 3.
59. **Губин А. И.** Электретный микрофон. — «Радио», 1960, № 3.
60. **Элементы** телефонных аппаратов. — «Радиоэлектроника в 1969 г.», т. 4, с. 22.

2

ТРЕБОВАНИЯ К ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА

2.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как следует из анализа кривых рис. 1.5 и 1.6, разборчивость S увеличивается с ростом уровня речи только в определенных пределах. Дальнейшее повышение уровня на приеме приводит к снижению разборчивости. В точке перегиба характеристики отношение сигнал/помеха достигает максимального значения около 50 дБ, после чего разборчивость начинает снижаться. Максимум разборчивости имеет место в тишине и при небольших уровнях шума. Такая закономерность остается справедливой как для различных спектров шума, так и для трактов с самыми разнообразными характеристиками. При высоких уровнях шума разборчивость монотонно возрастает вплоть до порога болевого ощущения.

Из рассмотрения кривых рис. 1.5 и 1.6 также следует, что уровни речи, соответствующие максимуму разборчивости, повышаются по мере роста уровня шума. Например, при уровне шума 40 дБ величина $S_{\text{макс}}$ достигается (см. рис. 1.6) уже при уровне речи $B_{\text{р}\Sigma} \approx 93$ дБ. Если $B_{\text{ш}\Sigma} = 80$ дБ, максимум соответствует $B_{\text{р}\Sigma} \approx$ ≈ 125 дБ, т. е. уровню на границе болевого ощущения. При более высоком уровне шума максимум выходит за пределы возможностей человеческого уха.

Наличие максимума разборчивости можно объяснить следующим образом. В тишине и при слабых шумах по мере повышения уровня речи на приеме все более слабые составляющие речи оказываются над порогом слышимости. Разборчивость растет до тех пор, пока все компоненты речи, вплоть до самых слабых, не достигнут уха. Дальнейшее повышение уровня речи не может увеличить разборчивость, так как за пределами динамического диапазона речевой сигнал уже не содержит никакой дополнительной информации и вероятность восприятия достигает своего максимального значения $P=1$.

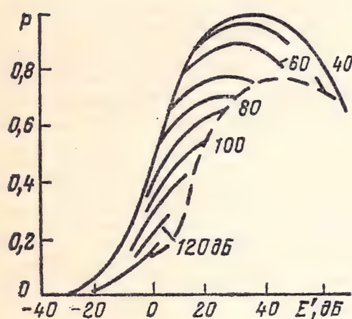


Рис. 2.1. Зависимость вероятности P от уровня ощущения E' формант при различных уровнях шума (параметр кривых)

При более высоких уровнях шума характер зависимостей тот же, но увеличение отношения сигнал/помеха за счет повышения уровня речи ограничивается порогом болевого ощущения. Для учета явления максимума разборчивости введено понятие дополнительной маскировки, влияние которой растет с повышением уровня шума. Согласно этой гипотезе, уровень ощущения может увеличиваться с ростом усиления при условии, если приращение маскировки меньше, чем приращение чувствительности; при их равенстве достигается оптимальная чувствительность.

На рис. 2.1 приведены экспериментальные зависимости вероятности восприятия P от уровня ощущения формант E' при разных уровнях шума. Кривые показывают, что максимум разборчивости в зависимости от уровней шума достигается при разных величинах E'. Так, при уровнях шума 40—70 дБ, наиболее характерных для условий эксплуатации телефонных аппаратов общего применения, максимуму соответствует величина $E'=25$—35 дБ.

2.2. ОПТИМАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Увеличение коэффициента передачи (усиления) разговорного тракта целесообразно только до тех пор, пока оно приводит к увеличению отношения сигнал/помеха, и допустимо, если это отношение не ухудшается. Чувствительность тракта (коэффициент передачи, усиление), соответствующая максимальной величине разборчивости, получила название оптимальной, а ее зависимость от частоты — оптимальной частотной характеристики.

Решение задачи по определению оптимальной характеристики графическим путем впервые было дано Ю. С. Быковым [11], аналитически В. К. Иофе и М. А. Сапожковым [3], а затем Н. Б. Покровским [17]. Теория этого вопроса подробно изложена в [13]. В основе полученных соотношений лежит нахождение максимума

уровня ощущения путем дифференцирования математического выражения для E по усилению R тракта с учетом полученной экспериментально зависимости дополнительной маскировки m от уровня ощущения шума Z.

На рис. 2.2 приведена оптимальная частотная характеристика $R_{опт}$ [7], полученная расчетным путем для телефонного аппарата АТС при работе его через линию затуханием 13 дБ и уровне шума 40 дБ. Величина $R_{опт}$ в области частот, выше 400 Гц, равна 10—12 дБ, в то время как коэффициент передачи (чувствительность, усиление) микрофона и телефона[1)] $R_{м.т}$ существующих телефонных аппаратов несколько ниже нуля. Кривая на рис. 2.2 рассчитана для наиболее легких условий работы аппарата — затухание соединительной линии равно нулю, акустический шум практически отсутствует, эффективный уровень ощущения речи 40 дБ.

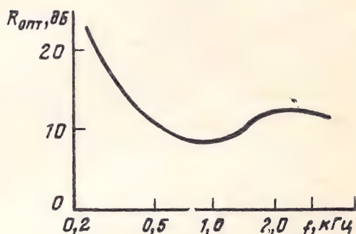


Рис. 2.2. Оптимальная частотная характеристика

Гораздо более важной задачей является отыскание оптимальных решений для трудных условий работы или хотя бы для условий, задаваемыми техническими требованиями на телефонный аппарат. Этими требованиями предусматриваются шумы с уровнем 60 дБ и затухание линии 31 дБ. Чтобы сохранить тот же уровень ощущения, характеристику на рис. 2.2 следовало бы поднять примерно на 17 дБ только для того, чтобы компенсировать повышение затухания линии на средних частотах; на верхних частотах этот подъем должен быть еще больше. Повышение уровня шума также потребует дополнительного увеличения усиления. Телефонный аппарат столь высокой чувствительности вряд ли можно включить в существующие линии связи. Поэтому оптимальные характеристики в телефонных аппаратах осуществимы только в ограниченной и не решающей области малых затуханий линии и малых уровней шума.

Из рассмотрения кривых рис. 2.1 следует, кроме того, что по мере роста уровня шума уровни речи, соответствующие максимуму разборчивости, приближаются к порогу болевого ощущения. Например, при уровне шума 70 дБ уровень речи на приеме для достижения оптимума должен быть ниже этого порога всего на 10 дБ. Для телефонного НЧ тракта это нереально.

2.3. РАЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При малых уровнях шума кривые, отражающие зависимость $S=\varphi(E_{р\Sigma})$, имеют в области, близкой к $S_{макс}$, пологий характер

[1)] Величина R может рассматриваться в зависимости от методики измерения как чувствительность (если речь идет об ЭДС, например, применительно к микрофону и телефону) или как коэффициент передачи (например, применительно к аппарату в целом), а по физическому смыслу также как усиление.

(см. рис. 1.5, 1.6). Значительное снижение уровня принимаемой речи вызывает незначительное уменьшение разборчивости. Так, например, согласно рис. 1.6 при уровне шума 50 дБ $S_{макс}=92\%$ достигается при уровне речи около 105 дБ. Если снизить уровень речи до 97,5 дБ, что примерно соответствует нулевому затуханию тракта, разборчивость упадет всего на 1%, а при уменьшении $B_{\Sigma р}$ на 15 дБ по сравнению с оптимальным значением — на 2%. Столь незначительные потери разборчивости при уменьшении усиления делают предпочтительнее ориентацию на так называемые «рациональные» характеристики, которые выбираются, исходя из допустимой величины потери разборчивости. Выигрыш от этого тем больше, чем меньше уровень шума. С повышением уровня шума кривые в области, близкой к максимуму, становятся круче. Снижение уровня ощущения на 1 дБ в тишине дает выигрыш в усилении 31 дБ [13], потере уровня ощущения на 2 дБ соответствует при уровне шума 40 дБ возможность снижения усиления на 12 дБ, а при уровне шума 70 дБ только 7 дБ. Таким образом, и рациональные характеристики эффективны только в благоприятных легких условиях и не позволяют сколь-либо значительно удалиться от уровней, близких к перегрузке слуха, при более тяжелых условиях.

2.4. ПРЕДЕЛЬНО ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Если пренебречь дополнительной маскировкой, существование которой рядом авторов ставится под сомнение, отвлечься от оптимальных характеристик и допустимых отступлений от них по изложенным выше соображениям, то частотные характеристики могут быть найдены исходя из следующего. Допустимая чувствительность определяется разностью уровней помех, не зависящих от усиления (коэффициента приемопередачи, чувствительности) и зависящих от него. Это положение непосредственно вытекает из теории рациональных характеристик [13]. Однако, поскольку здесь предполагается другой методический подход, эти характеристики, в отличие от рациональных и оптимальных, назовем иначе, например предельно целесообразными, а в ряде случаев допустимыми, так как речь идет о целесообразном и допустимом ограничении величины $R_{м.т}$. В случае сохранения за ними названия «рациональные» пришлось бы всякий раз ссылаться на различия в методике получения их.

Для последующего анализа и расчетов возьмем за основу структурную схему приемопередачи, изображенную на рис. 2.3. Уровень ощущения E спектрального уровня речи $B_р$, когда порог слышимости определяется спектральным уровнем шумов под заглушкой телефона (в ухе абонента) — $B_{ш.з}$, равен

$$E = B_р - a_л + R_а - B_{ш.з} = B_р - a_{тр} + R_{м.т} - B_{ш.з}, \qquad (2.1)$$

где $a_л$ — затухание линии; $R_а$ — коэффициент передачи аппарата, включая затухания $a_{пр}$, $a_{пер}$ схемы на прием и передачу: $R_а=$

$=R_{м.т}-a_{пер}-a_{пр}$, $a_{тр}$ — суммарное затухание линейной части тракта, включая и затухания схемы телефонного аппарата на прием и передачу: $a_{тр}=a_{л}+a_{пер}+a_{пр}$; $R_{м.т}$ — суммарная чувствительность микрофона и телефона.

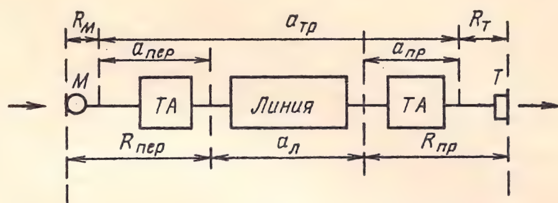


Рис. 2.3. Структурная схема приемопередачи

Величина $B_{ш.з}$ для телефонного тракта слагается из спектральных уровней различных помех, проникающих к уху (под заглушку телефона):

$$B_{ш.з}=B_{а.з}\,(+)\,B_{э.п.з}\,(+)\,B_{тр}\,(+)\,B_{м.э}\,(+)\,B_{п}. \qquad (2.2)$$

Индексы у величин B соответствуют: а.з — акустическому шуму помещения приема; э.п.з — электрическим помехам из линии; тр — акустическому шуму, проходящему через тракт из помещения передачи; м.э — шуму местного эффекта; п — помехам от переходных разговоров в линии; (+) означает суммирование по интенсивности. При этом

$$B_{а.з}=B_{а}-a_{з}, \qquad (2.3)$$

$$B_{э.п.з}=B_{э.п.л}-a_{пр}+R_{т}, \qquad (2.4)$$

$$B_{тр}=B_{а2}-a_{ш}+R_{а}-a_{л}=B_{а2}-a_{ш}-a_{тр}+R_{м.т}, \qquad (2.5)$$

$$B_{м.э}=B_{а}-a_{ш}-a_{м.э}+R_{м.т}, \qquad (2.6)$$

$$B_{п}=B_{р2}+R_{пер2}-a_{п}+R_{пр}. \qquad (2.7)$$

Индексы при затухании a означают: з — заглушки; ш — шумозащищенности микрофона; л — линии; м.э — местного эффекта; п — переходных разговоров; цифра 2 относится ко второй мешающей линии или ко второму концу тракта.

При равенстве уровней интенсивности шумов в приемном и передающем помещениях, равной громкости передачи речи по мешающему и подверженному помехам трактам и идентичных характеристиках $R_{а}$ получим из [(2.1)—(2.7)].

$$E=B_{р}+R_{м.т}-a_{тр}-[(B_{а}-a_{з})\,(+)\,(B_{э.п.л}-a_{пр}+ R_{т})\,(+)\,(B_{а}-a_{ш}-a_{тр}+R_{м.т})\,(+)\,(B_{а}-a_{ш}-a_{м.э}+ R_{м.т})\,(+)\,(B_{р}-a_{п}+R_{а})]. \qquad (2.8)$$

Уровни части входящих в это уравнение помех ($B_{м.э}$, $B_{тр}$, $B_{п}$) зависят от $R_{а}$ или $R_{м.т}$ и увеличиваются с увеличением коэффициента передачи телефонного аппарата; величина $B_{э.п.з}$ зависит толь-

ко от $R_т$; величина $B_{а.з}$ от $R_а$ не зависит. Повышение $R_{м.т}$ целесообразно только до тех пор, пока не будут достигнуты соотношения: если задана чувствительность телефона

$$(B_{м.э}\,(+)\,B_{тр}\,(+)\,B_п) \gg (B_{а.з}\,(+)\,B_{э.п.з}) \qquad (2.9)$$

или если задана чувствительность микрофона и $R_{м.т}$ возрастает за счет $R_т$:

$$(B_{м.э}\,(+)\,B_{тр}\,(+)\,B_п\,(+)\,B_{э.п.з}) \gg B_{а.з}. \qquad (2.10)$$

В этих условиях уровень ощущения уже не зависит от $R_а$ и $R_{м.т}$, а ур-ние (2.8) в соответствии с (2.9) и (2.10) примет вид

$$E = B_р - a_{тр} - [(B_а - a_ш - a_{тр})\,(+)\,(B_а - a_ш - a_{м.э})\,(+)\,(B_р - a_п - a_{пр} - a_{пер})], \qquad (2.11)$$

$$E = B_р - a_{тр} - [(B_а - a_ш - a_{тр})\,(+)\,(B_а - a_ш - a_{м.э})\,(+)\,(B_р - a_п - a_{пр} - a_{пер})\,(+)\,(B_{э.п.л} - a_{пр} + R_т)]. \qquad (2.12)$$

Неравенства (2.9) и (2.10) можно заменить уравнениями

$$(B_{м.э}\,(+)\,B_{тр}\,(+)\,B_п) = (B_{а.з}\,(+)\,B_{э.п.з}) + \Delta B, \qquad (2.13)$$

$$(B_{м.э}\,(+)\,B_{тр}\,(+)\,B_п\,(+)\,B_{э.п.з}) = B_{а.з} + \Delta B. \qquad (2.14)$$

Величина ΔB задается из соображений допустимой потери разборчивости. Если, например, положить $\Delta B = 6$ дБ, то этой величине соответствует приращение суммарного уровня шума на 0,98 дБ, при $\Delta B = 10$ дБ — на 0,4 дБ. В пределах прямолинейной части характеристики, отражающей зависимость формантной разборчивости A от уровня ощущения E [7], снижению E на 1 дБ соответствует уменьшение формантной разборчивости A на 0,15% в каждой из n полос. При $n = 15$ сумма ΣA составит $15 \cdot 0{,}15 = 2{,}25\%$. В области предельно допустимой градации качества ($A = 15$—25%) это соответствует снижению слоговой разборчивости примерно на 4%, а при отличном качестве ($A > 50\%$)—на 1,6%. При $\Delta B = 10$ дБ получим соответственно следующие величины слоговой разборчивости—1,4 и 0,6%.

Таким образом, при любом сколь угодно большом повышении $R_{м.т}$ после достижения соотношений (2.13), (2.14) увеличение формантной разборчивости речи не превысит названных выше величин: около 4% при $\Delta B = 6$ дБ и 1% при $\Delta B = 10$ дБ. Варьирование частотной характеристикой в этих условиях не имеет смысла, так как повышение $R_{м.т}$ в какой-то области частот не может при заданных уровнях шумов вызвать увеличение разборчивости выше полученного путем расчета значения.

Предельно целесообразную величину $R_{м.т.ц}$, выше которой повышать чувствительность микрофона и телефона нецелесообразно, можно получить из (2.11) и (2.12), подставив в них (2.13) и (2.14) и определив $R_{м.т}$. Если задана чувствительность телефона $R_т$, то

$$R_{м.т.ц} = [(B_а - a_з)\,(+)\,(B_{э.п.л} - a_{пр} + R_т)] + \Delta B - [(B_а - a_ш - a_{м.э}) + (B_а - a_ш - a_{тр})\,(+)\,(B_р - a_п - a_{пер} - a_{пр})]; \qquad (2.15)$$

если задана чувствительность микрофона $R_м$, то

$$R_{м.т.ц} = (B_а - a_з) + \Delta B - [(B_а - a_ш - a_{м.э}) (+) (B_а - a_ш - a_{тр}) (+) (B_р - a_п - a_{пер} - a_{пр}) (+) (B_{э.п.л} - a_{пр} + R_т)]. \quad (2.16)$$

Из (2.15) и (2.16) следует, что чем выше уровень акустических шумов, проникающих к уху слушающего на приеме (а при заданном $R_т$ и линейных электрических помех), по сравнению с суммарным значением всех остальных шумов и помех, определяемых величиной $R_{м.т}$, тем больше может быть величина $R_{м.т.ц}$. Чем больше затухание цепи местного эффекта, шумозащищенность микрофона и переходное затухание, тем больше может быть величина $R_{м.т.ц}$. Рассмотрим влияние помех различного типа на характеристики предельно целесообразных величин коэффициента приемопередачи.

2.5. ВЛИЯНИЕ МЕСТНОГО ЭФФЕКТА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ $R_{м.т.ц}$

Если шумы местного эффекта преобладают над всеми другими шумами, величины которых входят в (2.15), а это может иметь место при достаточно высоких акустических шумах на приеме (порядка 60—70 и более дБ), больших затуханиях тракта и малых величинах $a_п$, $a_{м.э}$, $a_ш$, то

$$R_{м.т.ц} = (B_а - a_з) + \Delta B - (B_а - a_ш - a_{м.э}) = a_{м.э} + a_ш - a_з + \Delta B. \quad (2.17)$$

Таким образом, величина $R_{м.т.ц}$ определяется в этих условиях только шумозащищенностью трех основных элементов аппарата— микрофона, телефона и схемы ($a_{м.э}$) и не зависит от уровня акустических шумов и затухания линии. Шумозащищенность $a_ш$ обычного микрофона давления определяется небольшой направленностью его на частотах выше 1000 Гц и доходит до 3—5 дБ. Затухание слуховой раковины (заглушки) $a_з$ (см. рис. 1.12) при неплотном прижатии ее к уху (что характерно при больших помехах от местного эффекта) в области низких частот также близко к нулю, а дальше увеличивается до 9—11 дБ. Таким образом, разность $a_ш - a_{м.э}$ на низких частотах близка к нулю, а в области верхних частот не превышает 4—6 дБ. Следовательно, для $f \leqslant 1000—1200$ Гц

$$R_{м.т.ц} \approx a_{м.э} + \Delta B \quad (2.18)$$

и зависит только от характеристик $a_{м.э}$; на более высоких частотах отклонение от (2.18) невелико.

Уровень ощущения речи в условиях преобладания шумов местного эффекта

$$E = B_р - a_{тр} - (B_а - a_ш - a_{м.э}). \quad (2.19)$$

и не зависит от $R_{м.т}$. Отыскание предельно целесообразных характеристик сводится к определению условий, при которых достига-

ется (2.19). Для расчетов выберем спектр акустического шума речевого типа в качестве одного из наиболее распространенных в служебных и жилых помещениях. Большинство других шумов (транспортных, производственных, усредненных для жилых помещений) по спектральным характеристикам также близки к речевому шуму (см. приложение 2).

На рис. 2.4 приведены результаты расчета по (2.17) характеристик $R_{\text{м.т.ц}}$ при $\Delta B = 6$ дБ для условий значительного рассогласования баланса цепи местного эффекта, соответствующего случаю работы по воздушной линии аппарата, рассчитанного на входное сопротивление кабельной линии. При более высоком затухании цепи местного эффекта по сравнению с этим самым неблагоприятным случаем характеристики $R_{\text{м.т}}$ пойдут выше. На рис. 2.4 приведены, кроме того, характеристики $R_{\text{м.т}}$ пары микрофон МК-16 + телефон ТА-4. Рисунок 2.4 позволяет оценить наличие избытка чувствительности этой пары в сравнении с пределом, выше которого в заданных условиях разборчивость не увеличивается. Увеличение $R_{\text{м.т}}$ в условиях, когда $R_{\text{м.т}} > R_{\text{м.т.ц}}$, хотя и не дает улучшения качества связи, но не дает и ухудшения ее, а потому (если $R_{\text{м.т}}$ не лимитируется другими факторами) вполне допустимо, так как может обеспечить повышение отношения сигнал/помеха в других, более благоприятных условиях. Здесь и в дальнейшем при определении $R_{\text{м}}$ для перехода от чувствительности к отдаче на согласованную нагрузку вводится поправка к официальным данным, равная —6 дБ.

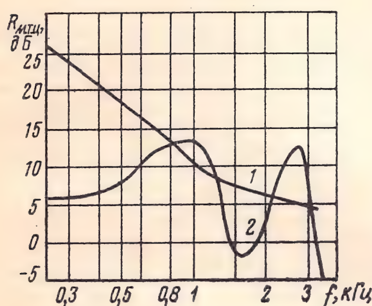


Рис. 2.4. Частотные характеристики коэффициента передачи $R_{\text{м.т.ц}}$:

1 — для случая, когда $a_{\text{м.з}}$ мало́; *2* — для микрофона МК-16Т + телефона ТА-4

2.6. ОГРАНИЧИВАЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РАЗГОВОРОВ НА ОБЩИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ $R_{\text{а}}$

Лимитирующее влияние переходных разговоров на частотные характеристики $R_{\text{а}}$ следует рассмотреть с двух точек зрения: а) влияния помех от переходных разговоров и б) допустимой внятности переходных разговоров.

Помехи от переходных разговоров. Влияние переходных разговоров особенно проявляется при большом затухании тракта и малых помехах от местного эффекта. Тогда в ур-нии (2.8) $(B_{\text{тр}}(+)B_{\text{м.э}}) \ll (B_{\text{а.з}}(+)B_{\text{э.п.з}}(+)B_{\text{п}})$. В этих условиях уровень ощущения прямой (не переходной) речи определяется соотношением

$$E = B_{\text{р}} - a_{\text{л}} + R_{\text{а}} - [(B_{\text{а}} - a_{\text{з}})(+)(B_{\text{э.п.л}} - a_{\text{пр}} + R_{\text{т}})(+)(B_{\text{р}} - a_{\text{п}} + R_{\text{а}})]. \quad (2.20)$$

Увеличение коэффициента передачи $R_а$ аппарата в этих условиях целесообразно лишь до тех пор, пока не будет достигнуто неравенство

$$B_п \gg (B_{а.з} (+) B_{э.п.з}); \; B_п = (B_{а.з} (+) B_{э.п.з.}) + \Delta B. \qquad (2.21)$$

Тогда ур-ние (2.20) примет вид

$$E = a_п - a_л, \qquad (2.22)$$

Это уравнение совпадает с известным выражением для защищенности $A_з = a_п - a_л$. Это значит, что защищенность эквивалентна уровню ощущения речи над помехой от переходных разговоров при отсутствии других помех.

Сопоставляя ур-ние (2.22) для условий преобладания помех от переходных разговоров с ур-нием (2.19) для случая преобладания помех от местного эффекта, можно установить, что уровень ощу-

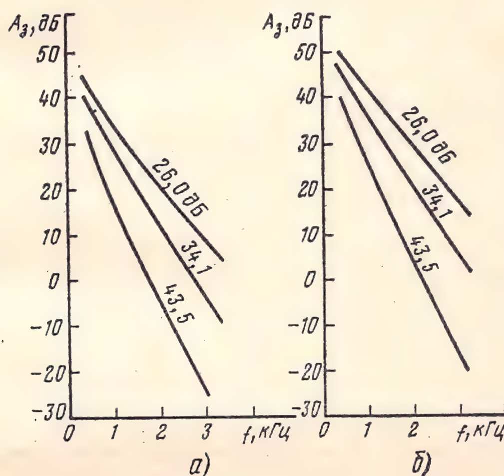


Рис. 2.5. Частотные характеристики защищенности $A_з$ при разных затуханиях линии (параметр кривых); а) $a_п = 60$ дБ; б) $a_п = 70$ дБ

щения речи, а следовательно, и разборчивость, когда $R_{м.т}$ определяется помехами от местного эффекта, могут быть повышены путем улучшения таких характеристик телефонного аппарата, как $a_{м.э}$ и $a_ш$.

В условиях определяющего влияния помех от переходных разговоров величина $R_а$ не зависит от характеристик аппарата, она зависит только от разности между характеристиками линии $a_п$ и $a_л$.

На рис. 2.5 приведены частотные характеристики защищенности $A_з$ (т. е. уровня ощущения E) при разных затуханиях кабельной линии $a_л$. Как видно из рисунка, величина $A_з$ резко падает с ростом частоты, особенно при больших $a_л$ и малых $a_п$, так как $a_л$ с возрастанием частоты увеличивается, а $a_п$ несколько умень-

шается (для кабельных линий приблизительно по закону $\ln(f_2/f_1)$ [18]). Для коммутационных устройств это снижение несколько меньше. При $a_п=60$ дБ величина $A_з$ становится отрицательной, а это значит, что уровни переходных разговоров становятся выше уровней речи на частоте более 2800 Гц уже при $a_л=35$ дБ, а при $a_л=43$ дБ зона отрицательных величин охватывает всю область частот выше 1700 Гц. При увеличении перекрываемого затухания до 43 дБ положительные величины $A_з$ обеспечиваются только в диапазоне до 2100 Гц даже при $a_п=70$ дБ. Таким образом, увеличению дальности телефонирования препятствует величина переходного затухания между цепями.

Согласно статистическим данным кабельной лаборатории ЦНИИС ЛФ, приведенным в [21], распределение переходных затуханий на ближнем конце характеризуется цифрами, приведенными в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип линий	Распределение, %, переходного затухания величиной, дБ				
	до 43	43—52	52—61	61—70	свыше 70
Абонентские	2,84	2,24	1,26	5,34	88,2
Магистральные	1,67	0,65	0,91	5,8	90,8

Экспериментальные данные, характеризующие зависимость слоговой разборчивости речи от величины переходного затухания $a_п$ при $a_л=35$ дБ, приведены в табл. 2.2 [19, 4, 5].

Таблица 2.2

Напряжение электрических шумов	Величина слоговой разборчивости S, %, при $a_л$, равном, дБ				
	78	70	61	52	43
Без шумов	77	70	62	55	45
$U_ш=1$ мВ псоф	57	56	54	50	45

Маскирующее действие переходных разговоров, как это следует из табл. 2.2, особенно велико при отсутствии электрических помех, а влияние последних особенно заметно при больших величинах $a_п$. Так, например, когда $a_п=78$ дБ, помеха напряжением 1 мВ вызывает снижение разборчивости с 77 до 57%, а при $a_п=43$ дБ снижения нет, т. е. $S=45\%$ как при наличии, так и при отсутствии помехи.

Предельно целесообразная величина $R_{м.т.ц}$, при которой достигается соотношение (2.21) и дальнейшее увеличение $R_{м.т}$ становится нецелесообразным, может быть выражена уравнением

$$R_{м.т.ц} = [(B_а - a_з)(+)(B_{э.п.л} - a_{пр} + R_т)] + \Delta B - (B_р - a_п - a_{пр} - a_{пер}). \quad (2.23)$$

В условиях преобладания акустических шумов над электрическими из (2.21) получим

$$R_{м.т.ц} = (B_а - a_з) + \Delta B - (B_р - a_п - a_{пр} - a_{пер})]. \qquad (2.24)$$

а при $B_{э.п.л} \gg B_{а.з}$

$$R_{м.т.ц} = (B_{э.п.л} - a_{пр} + R_т) + \Delta B - (B_р - a_п - a_{пр} - a_{пер}), \qquad (2.25)$$

Результаты расчета $R_{м.т.ц}$ по (2.24) и (2.25) приведены на рис. 2.6, при этом принято $\Delta B = 6$ дБ, $B_р = 97{,}5$ дБ, $a_п = 60$ дБ. Параметрами на рис. 2.6*а* являются уровни акустических помех, а на рис. 2.6*б* — псофометрические напряжения электрических помех. На рис. 2.6*а*, кроме того, нанесена кривая $R_{м.т}$ для микрофона МК-16 и телефона ТА-4. Как видно из рисунка, в условиях помех от переходных разговоров при $a_п = 60$ дБ и уровне шума 40 дБ, т. е. практически в тишине, чувствительность этих микрофона и телефона близка к предельно целесообразной, а в шумах более высокого уровня имеется возможность повышения чувствительности. Для электрических помех характеристика $R_{м.т}$ (МК-16+ТА-4) лежит в области напряжений 0,1—0,2 мВ псоф.

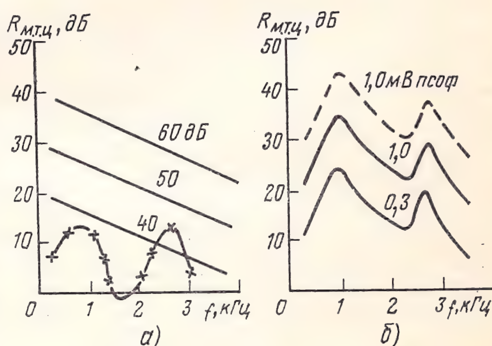


Рис. 2.6. Предельно целесообразные характеристики коэффициента передачи $R_{м.т.ц}$ с учетом ограничивающего влияния помех от переходных разговоров в условиях: *а*) акустических шумов (дБ); *б*) линейных электрических помех (мВ псоф); —— $a_п = 60$ дБ; — — $a_п = 70$ дБ, х—х—х МК-16Т+ТА-4

Так же, как и при помехах от местного эффекта, увеличение $R_{м.т}$ в области, где $R_{м.т} > R_{м.т.ц}$, не дает увеличения разборчивости речи, но не дает и ее ухудшения, а потому характеристики на рис. 2.6 показывают только рациональные пределы условий, при которых проявляется ограничивающее влияние помех от переходных разговоров, но они не могут служить преградой для увеличения $R_{м.т}$. Повышение $R_{м.т}$ может дать увеличение разборчивости при бо́льших величинах $a_п$, $B_а$, $B_{э.п.л}$.

Внятные переходы и предельно допустимые характеристики $R_{м.т}$. Основные препятствия к достижению таких характеристик $R_{м.т}$, при которых обеспечивается максимальная разборчивость речи в условиях помех от переходных разговоров, заключается в том, что помехи эти, в отличие от всех других, несут в себе разборчивость и при повышении $R_{м.т}$ наряду с увеличением разборчивости речи, передаваемой по прямому каналу, растет и разборчивость переходных разговоров. Внятные переходы чрезвычайно нежелательны, а в ряде случаев совершенно недопустимы. Поэтому

здесь речь может идти о предельно допустимых, а не о предельно целесообразных характеристиках.

Уровень ощущения переходного разговора при однотипных аппаратах на мешающей и подверженной помехам линиях определяется соотношением

$$E = B_р + R_а - a_п - B_{ш.з}. \qquad (2.26)$$

В качестве предельно допустимых условий при заданной разборчивости переходных разговоров может быть получено неравенство

$$B_р + R_а - a_п - B_{ш.з} \leqslant E_{зад}. \qquad (2.27)$$

Для того чтобы разборчивость переходных разговоров была равна нулю, необходимо, чтобы уровень ощущения пиков речи был нулевой или ниже нуля, т. е. $E = -12$ дБ (величина пикфактора речи). Практически иногда бывает достаточно, чтобы переходные разговоры были непонятны, хотя и слышны, что соответствует смысловой разборчивости J, близкой к нулю. Из кривых, связывающих J и S, можно установить, что в пределах $S \leqslant 7\%$ величина J не превышает 10%; далее величина J резко возрастает даже при незначительном увеличении S. Слоговой разборчивости 7% соответствует формантная разборчивость 3,2%. При ширине полосы эффективно передаваемых частот 3400 Гц (16 полос) она составит примерно 0,2% на полосу, что соответствует уровню ощущения среднего уровня речи — 8 дБ. В практических условиях могут быть приняты другие, менее жесткие требования, например, чтобы разборчивость переходных разговоров была несколько ниже неудовлетворительной ($\Sigma A \leqslant 10\%$, $E \leqslant -2$ дБ).

Из выражения (2.27) можно определить допустимую предельную величину $R_{а.д}$, при которой уровень ощущения в частотных полосах будет не выше заданного:

$$R_{а.д} = a_п - (B_р - B_а) + E_{зад}. \qquad (2.28)$$

Акустические шумы на приеме и передаче могут отсутствовать ($B_{а.з} (+) B_{тр} (+) B_{м.э} = 0$), но в этих условиях не должно быть внятных переходных разговоров. Линейные электрические помехи имеются в линиях почти всегда. Рассмотрим их влияние на разборчивость переходных разговоров. Для этого случая выражение (2.26) при условии $B_{э.п.з} \gg x_{0д}$ (где $x_{0д}$ — порог слышимости по давлению) примет вид

$$E = (B_р + R_{пер} + R_{пр}) - a_п - (B_{э.п.л} + R_{пр}) =$$
$$= B_р - a_п + R_{пер} - B_{э.п.л}. \qquad (2.29)$$

Это значит, что уровень ощущения переходных разговоров определяется в этих условиях разностью их уровней и электрической помехи на входе телефонного аппарата и не зависит от $R_{пр}$ и $R_т$. Следовательно, когда нет других помех, кроме линейных электрических, или эти помехи малы, чувствительность телефона можно повышать, не опасаясь роста разборчивости переходных разгово-

ров. Последняя в данных условиях определяется только величиной $R_{пер}$, предельно допустимое значение которого выражается согласно (2.29) соотношением

$$R_{пер.д} = a_п - B_р + B_{э.п.л} + E_{зад} + 94 \text{ дБ}. \quad (2.30)$$

В этом уравнении 94 дБ нужно для перехода от уровня порога слышимости $2 \cdot 10^{-5}$ к 1 Н/м². Кроме того, если уровень $B_{э.п.л}$ определен по отношению к 0,775 В, для перевода его к 1 В надо ввести еще поправочный коэффициент 2,2 дБ. Тогда $R_{пер}$ будет иметь величину, выраженную в $\frac{В}{Н/м^2}$, как это принято для коэффициента передачи.

Напряжения шумов в линиях связи могут достигать 1 мВ псоф, но в 82—93% случаев оно не превышает 0,2 мВ псоф, а в 86—95% случаев — 0,3 мВ псоф. Спектры электрических помех в линиях и каналах связи в подавляющем большинстве случаев имеют спадающую тенденцию от 6—7 до 15—20 дБ/окт. Крутизна спада обычно увеличивается с ростом частоты. Такой разброс характеристик спектров делает затруднительным выбор типового спектра для расчета, тем более что отсутствуют статистические данные, которые позволили бы получить усредненную характеристику в зависимости от встречаемости помех данного типа. Наиболее неблагоприятной с точки зрения маскировки переходных разговоров являются помехи с малой интенсивностью в области верхних частот. Для расчета примем спектральные характеристики с тенденцией спада 6 дБ/окт в области нижних и средних частот и до 10—12 дБ на верхних частотах диапазона, которые по характеру являются близкими к крайним, но не самыми крайними и могут с какой-то степенью приближения считаться типичными. Этот же тип электрических помех принят и при расчетах по (2.25). Проверка показала, что при электрической помехе этого типа напряжением $B_{э.п.л\Sigma} \geqslant 0{,}3$ мВ псоф. и при чувствительности приема порядка 10 Н/м² $X_{0д} \ll B_{э.п.л}$ практически во всем диапазоне частот. Поэтому усложняющая поправка для учета $X_{0д}$ может не вводиться.

Результаты расчета допустимой величины $R_{пер.д}$ для условий электрических помех выбранного типа и $E = -2$ дБ приведены на рис. 2.7. Для получения величины $R_{пер.д}$, соответствующей нулевому уровню ощущения пиков переходной речи ($E = -12$ дБ), кривые рис. 2.7 надо сдвинуть вниз на 10 дБ. На рисунке приведены также частотные характеристики коэффициента передачи аппарата с микрофоном МК-16Т [22].

Из кривых рис. 2.7 следует, что при минимально допустимом переходном затухании между цепями $a_п = 70$ дБ величина $R_{пер}$ аппарата с микрофоном МК-16Т при электрических помехах напряжением 1 мВ псоф. находится в области самых верхних частот несколько выше предельно допустимой величины. При электрических помехах напряжением 0,5—0,4 мВ псоф. величина $a_п$ должна

быть не ниже 80 дБ; тогда $R_{пер}$ на верхних частотах не превысит величину, соответствующую $E_{зад}=-2$ дБ.

Кривые, приведенные на рис. 2.7, позволяют вычислить разборчивость переходных разговоров, так как любая из кривых $R_{пер.д}$ соответствует уровню ощущения $E=-2$ дБ. Построив на рис. 2.7 частотную характеристику $R_{пер}$ телефонного аппарата, определив разность между ней и любой из кривых для $R_{пер.д}$ и прибавив к полученной величине 2 дБ, получим уровень ощущения переходного разговора для выбранных условий. Так, например, для аппарата с микрофоном МК-16Т при $a_п=60$ дБ и $B_{э.п.л\ \Sigma}=1$ мВ псоф. разборчивость переходного разговора $S=11\%$, что ниже градации качества «предельно допустимое». При $a_п=70$ дБ и напряжении электрической помехи 0,3 мВ псоф. $S\approx 15\%$. При меньших величинах $a_п$ и $B_{э.п.л}$ существует реальная опасность внятных переходов.

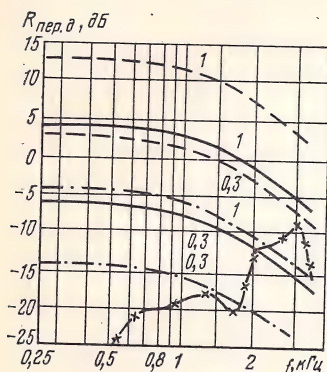


Рис. 2.7. Предельно допустимые характеристики коэффициента передачи $R_{пер.д}$, при которых разборчивость переходных разговоров ниже градации «неудовлетворительно», для различных напряжений линейных электрических помех:

—·— $a_п=60$ дБ; ——— $a_п=70$ дБ; — — — $a_п=78$ дБ; —×—× с МК-16Т

Шумы на абонентских линиях не превышают 0,3 мВ псоф. в 86—95% случаев [19], а согласно данным, приведенным в [21], встречаемость $a_п\leqslant 70$ дБ имеет место на абонентских линиях в 11,8% случаев, а на магистральных — в 9,2% случаев; для $a_п\leqslant 60$ дБ эти цифры соответственно равны 6,34 и 3,23%.

Приводимые здесь данные свидетельствуют об опасном влиянии пониженных переходных затуханий на внятные переходные разговоры.

2.7. ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ АППАРАТА

В разд. 2.6 определены предельно допустимые характеристики коэффициента передачи, при которых разборчивость переходных разговоров не превышает заданного предела. Рассмотрим, какими должны быть эти характеристики, если подходить к ним не с точки зрения ограничений, вызываемых помехами, зависящими от $R_м$ (к числу таких помех относятся $B_{м.э}$, $B_{тр}$, $B_п$), а с точки зрения обеспечения нужной разборчивости речи. Уровень ощущения речи E, соответствующий заданной разборчивости ее, если исключить влияние $B_{м.э}$, $B_{тр}$, $B_п$, выразится соотношением

$$E = B_р + R_{пер} + R_{пр} - a_л - [(B_а - a_з)(+)(B_{э.п.л} + R_{пр})]. \qquad (2.31)$$

Чтобы проследить отдельно влияние акустических и линейных

помех, проанализируем два уравнения:

$$E = B_р - a_л + R_{пер} + R_{пр} - (B_а - a_э), \qquad (2.32)$$

$$E = B_р - a_л + R_{пер} - B_{э.п.л}. \qquad (2.33)$$

Это значит, что в условиях акустических помех уровень E зависит как от $R_{пер}$, так и от $R_{пр}$ и может быть повышен с помощью того и другого. При электрических помехах в линии E определяется разностью уровней сигнала и помехи на входе приемного аппарата не зависят от $R_{пр}$. Разборчивость может быть увеличена только за счет повышения коэффициента передачи. Аналогично, согласно (2.29), разборчивость переходных разговоров в тех же условиях может быть снижена только за счет уменьшения $R_{пер}$. Принимая за основу выражения (2.32) и (2.33) и задаваясь, как и раньше, величиной $E_{зад}$, получим

$$R_{пер.ц} = a_л - R_{пр} - B_р + (B_а - a_э) + E_{зад}, \qquad (2.34)$$

$$R_{пер.ц} = a_л - B_р + B_{э.п.л} + E_{зад}. \qquad (2.35)$$

На рис. 2.8 приведены результаты расчета $R_{пер.ц}$ при $E_{зад}=15$ дБ, что соответствует нижней градации качества «отлично» ($\Sigma A = 50\%$, при равномерном распределении E по частотному диапазону формантная разборчивость A в каждой из 16 частотных полос будет равна $\Sigma A/16=3{,}1\%$). При расчетах принято на всех частотах $R_{пр}=10$ дБ, что примерно соответствует средней величине $R_{пр}$ в случае применения телефона типа ТА-4. Суммарный уровень речи принят равным 97,5 дБ, уровень акустической помехи речевого типа 60 дБ, затухание линии $a_{л800}=31$ и 15,6 дБ. Расчетная характеристика $R_{пер.ц}$ в условиях электрических помех напряжением 2 мВ псоф. приведена на том же рисунке. При других величинах помех кривые пойдут выше или ниже. В данном случае интерес представляет только характер их частотной зависимости. При более равномерных спектрах помех характеристика $R_{пер.ц}$ пойдет круче. Когда $B_р - B_а = \varphi(f) = \text{const}$, ход характеристики, если не принимать во внимание величины $a_э$, целиком определяется частотной зависимостью затухания линий $a_л$. В случае электрических помех, характеристики которых приняты выше с тенденцией спада около 6 дБ/окт, за исключением самых верхних частот, где эта тенденция доходит до 10—12 дБ/окт, характер кривой $R_{пер.ц}$ во всем частотном диапазоне, кроме самых верхних частот, совпадает с кривой $R_{пер.ц}$ для акустических помех.

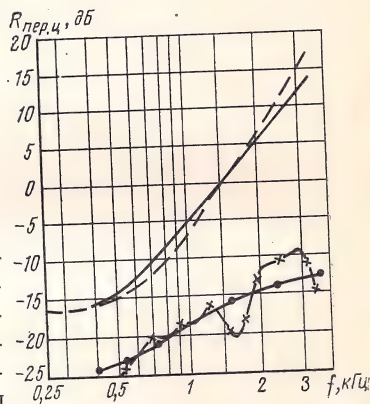


Рис. 2.8. Частотные характеристики коэффициента передачи $R_{пер.ц}$, при которых достигается «отличное» качество передачи речи:

——— $a_л=31$ дБ, уровень акустического шума 60 дБ; —·—·— $a_л=15{,}6$ дБ, уровень акустического шума 60 дБ; — — — $a_л=31$ дБ, уровень электрической помехи 2 мВ псоф; —×—× с МК-16Т

Характеристики $R_{пер}$, согласно рис. 2.8, при затухании линии $a_л=31$ дБ, принятом в качестве стандартного для сетей телефонной связи, должны иметь в диапазоне частот 300—3400 Гц тенденцию подъема около 30 дБ, что составляет примерно 7 дБ/окт. При $a_л=15,6$ дБ тенденция снижается до 3 дБ/окт. В ряде работ (см. ниже) установлено, что оптимальной является тенденция около 6 дБ/окт. Частотная зависимость затухания линии вносит в эти данные существенные коррективы.

Акустические и линейные электрические шумы не вызывают в рассматриваемых условиях никаких ограничений в отношении ве-

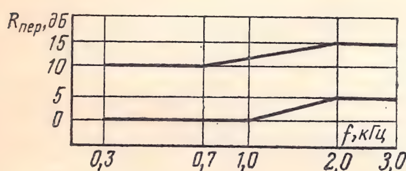


Рис. 2.9. Частотные характеристики коэффициента передачи по ГОСТ 9686—68

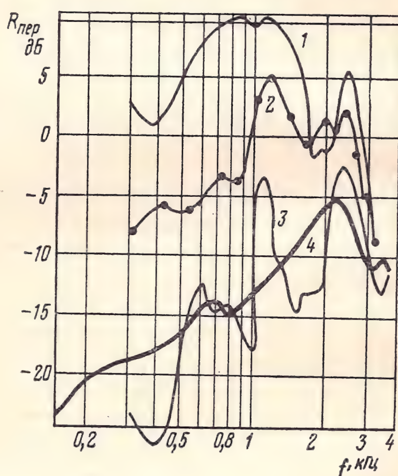


Рис. 2.10. Частотные характеристики коэффициентов передачи некоторых телефонных аппаратов:
1 — ТАУ-3, ТАУ-4; *2* — W-61, W-58 (ГДР); *3* — К-701 (США); *4* — Dialog (Швеция)

личины коэффициента передачи; чем выше уровень шума, тем больше должен быть $R_{пер.ц}$. Кривые рис. 2.8 позволяют только установить, не ниже какой величины должно быть $R_{пер}$ при заданных уровнях шумов, чтобы обеспечивать разборчивость не менее заданной.

В телефонных трактах крутизну подъема характеристики $R_{пер}$ в области верхних частот приходится снижать из-за опасности внятных переходов, помех от местного эффекта и от переходных разговоров. Во всех этих случаях, как показано выше, характеристика должна иметь спадающую тенденцию, иногда значительную. Поэтому от приведенных на рис. 2.8 характеристик и рассчитанных на максимальное значение $a_л$ приходится отступать, снижая $R_{пер}$ в области верхних частот, т. е. в конечном итоге — уменьшая величину тенденции. Как правило, ориентируются на характеристики для $a_л=a_{л.макс}/2$, т. е. $a_л=16$ дБ. На рис. 2.8 приведена также характеристика $R_{пер}$ с микрофоном типа МК-16Т. По характеру она близка к рациональной характеристике при $a_л=16$ дБ.

Согласно нормам ГОСТ [29] телефонный аппарат должен иметь коэффициент передачи, соответствующий граничным обла-

стям, изображенным на рис. 2.9. Нормы эти допускают широкие возможности для разброса частотных характеристик от спадающей тенденции 5 дБ (если соединить на рисунке левую верхнюю точку с правой нижней) до характеристики с подъемом до 15 дБ, т. е. 4 дБ/окт (если соединить левую нижнюю точку с правой верхней). В последнем случае характеристики близки к нижней кривой рис. 2.8 для $a_л = 16$ дБ. Характеристики коэффициентов передачи ряда современных телефонных аппаратов приведены на рис. 2.10 [14].

2.8. УРОВЕНЬ НА ВЫХОДЕ ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА

Удобнее нормировать не величину $R_{пер}$, а уровень речи на выходе телефонного аппарата. При известной величине коэффициента передачи уровень речи на выходе аппарата в частотной полосе шириной $\Delta f_к$ выразится соотношением

$$\beta_{вых} = B_р + 10 \lg \Delta f_к + R_{пер}. \qquad (2.36)$$

Допустимый уровень речи на выходе, при котором не будет превышен заданный уровень ощущения переходных разговоров, можно получить, если подставить в (2.36) значение $R_{пер}$ из (2.30). Тогда

$$\beta_{вых} = a_п + B_{э.п.л} + 10 \lg \Delta f_к + E_{зад} + 94 \text{ дБ}. \qquad (2.37)$$

Результаты расчета по (2.37) допустимой величины $U_{вых}$ для условий маскировки переходных разговоров линейными электрическими помехами напряжением 1 мВ псоф. при разных величинах переходного затухания приведены на рис. 2.11. Для перехода к помехам меньшего уровня кривые надо сдвинуть вниз на соответствующее число децибел. При помехах ниже 0,3 мВ псоф. следует учитывать порог слышимости в тишине.

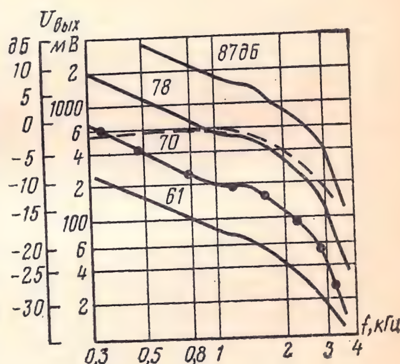


Рис. 2.11 Характеристики предельно допустимых уровней на выходе при различных переходных затуханиях (параметры кривых), напряжении электрических помех 2 мВ псоф., а также коэффициентах передачи аппаратов:
— — — ТА-57; —·—·— ТАУ-4

Из рис. 2.11 следует, что для рассматриваемых условий характеристика отдачи телефонного аппарата при подаче на его вход звуковых давлений, равных уровням речи в критических полосах, должна иметь спадающую тенденцию. Ограничения, накладываемые переходными разговорами как помехой, а также шумами местного эффекта, обусловливают целесообразность характеристик также с падающей тенденцией.

Эти требования наложили отпечаток на характеристики отдачи телефонного аппарата ТА-57, что обусловлено прежде всего тем, что в условиях его эксплуатации внятные

переходы особенно нетерпимы, в то время как качество полевых линий связи и коммутационных устройств при эксплуатации их в тяжелых климатических условиях не всегда позволяет надеяться на достаточно высокие переходные затухания. Кроме того, из-за высокой чувствительности на прием и передачу аппарат самовозбуждался на верхних частотах при несогласованном включении в линию. Опасность рассогласования цепи баланса здесь гораздо больше, чем в сетях общего пользования, так как параметры кабельных линий существенно отличаются друг от друга и от входного сопротивления воздушных линий и подвержены колебаниям в зависимости от погоды.

Верхняя граница характеристики отдачи аппарата ТА-57 при подаче на микрофон звуковых давлений, соответствующих средним уровням речи в частотных полосах, приведена на рис. 2.11 (в соответствии с нормами технических условий). Характеристика имеет спад в сторону верхних частот, хотя микрофон ДЭМШ-1 мог бы обеспечить более равномерную характеристику.

Современные местные, междугородные и международные телефонные сети и телефонные аппараты строго регламентируются по величине эквивалента затухания по громкости в соответствии с рекомендациями МККТТ. Это делается в международном масштабе в интересах обеспечения нужного качества связи, а также в целях сопряжения между сетями разных стран. Свойства телефонных аппаратов по эквиваленту затухания обычно нормируются вместе с абонентской линией, имеющей затухание 4,4 дБ, так как в этом случае учитывается влияние изменения тока питания микрофона и степень влияния согласованности телефонного аппарата с линией. В соответствии с существующими нормами [26, 33], основанными на рекомендациях МККТТ [32], для стран с большой территорией номинальный эквивалент затухания передающей системы между абонентом и первой международной цепью в 95% случаев не должен превышать 21,3 дБ. Многочисленные измерения показывают, что эти нормы на эквивалент затухания передачи удовлетворяются большинством телефонных аппаратов со значительным запасом [33].

Согласно рекомендациям МККТТ [23] суммарное затухание тракта должно составлять 22—29 дБ для местной сети и 24—30 дБ для междугородной цепи. Затухание абонентской линии при этом должно равняться 2×0,43 дБ и станционное затухание 2×1,3 дБ. Эти нормы положены в основу требований к телефонным аппаратам и искусственным трактам, применяемым для их испытаний [24, 14]. Общее затухание тракта принято равным 31 дБ, а затухание соединительной линии 20 дБ, что соответствует затуханию линии из многопарного кабеля типа ТГ с диаметром жилы 0,5 мм, протяженностью около 15 км, а из малопарного кабеля с диаметром жилы 1,2 мм — 23 км.

В соответствии со статистическими данными, полученными на основе анализа построения сетей 100 административных районов [23], процентное распределение длин межстанционных соедини-

тельных линий характеризуется следующими цифрами: на участке ОС—УС в 17% случаев длина составила больше 15 км; на участке УС—ЦС эта длина превышалась в 70% случаев и в 25% случаев она составляла от 30 до 80 км, что значительно превышает норму. Преодолеть это несоответствие можно было бы путем применения линий с меньшим километрическим затуханием, т. е. с увеличенным диаметром жил. Однако это связано с большими капитальными затратами, так как удельный вес затрат на межстанционные соединительные линии уже в настоящее время составляет около 50% от всех затрат на строительство телефонной сети и более 70% от затрат на линейные сооружения. Кроме того, при последующем районировании протяженность соединительных линий будет уменьшаться и кабели с большим диаметром жил не понадобятся. Поэтому для повышения дальности телефонирования целесообразнее использовать технические средства, в том числе и телефонные аппараты с повышенной чувствительностью на передачу, которые впоследствии могут быть заменены обычными аппаратами и переданы в другие районы с телефонной сетью, находящиеся в процессе становления.

Увеличение дальности телефонной связи для нашей страны с ее необъятными просторами играет существенную роль, особенно в малонаселенных районах со слабо развитой телефонной сетью, на новостройках и различных промыслах с разбросанными по территории объектами. Отечественная промышленность выпускает телефонные аппараты, предназначенные для удаленных абонентов, которые используются также в качестве кабинных телефонных аппаратов при связи по междугородным линиям (УКД-3М, ТАУ-4), имеющие усилители передачи и приема на транзисторах [14]. Аппараты повышенной чувствительности позволяют, кроме того, повысить предельные величины акустических помех, при которых возможна телефонная связь с помощью обычных телефонных аппаратов, а это имеет немаловажное значение, так как в условиях эксплуатации уровни шумов часто превышают те значения, которые предусматриваются нормами ТУ на телефонные аппараты общего применения (60 дБ).

Нормы на эквивалент затухания для телефонных аппаратов предусматривают пока только его нижнюю границу по принципу «не хуже» и не препятствуют, таким образом, повышению коэффициента передачи и уровня на выходе телефонного аппарата. К рассмотренным выше ограничениям коэффициента передачи и уровня на выходе следует добавить ограничения со стороны каналов ВЧ, особенно многоканальных систем передачи, во избежание перегрузки входов этой аппаратуры. Согласно материалам МККТТ [25] рекомендуется по мере возможности не использовать микрофоны, дающие повышенную по сравнению с обычными ТА выходную мощность. В других материалах МККТТ [26] отмечается, что во избежание перегрузки и переходных разговоров мощность речевых сигналов, передаваемых в линию громкоговорящими телефонными аппаратами, должна автоматически ограничи-

ваться. Для громкоговорящих телефонных аппаратов стабилизация выходного уровня особенно важна ввиду большой зависимости его от расстояния между ртом абонента и микрофоном, которое в условиях эксплуатации может существенно изменяться.

В обычных телефонных аппаратах стабилизация уровня на выходе также необходима, поскольку микрофоны, особенно угольные, имеют большой разброс по чувствительности. Согласно данным статистического обследования, проведенного на сетях связи США [27] с применением как телефонных аппаратов Белл-500, так и аппаратов старого типа 302, средние уровни на выходе коммутатора местной связи (вход соединительной линии) составили —15÷+19 дБ. Разброс уровней, включая и затухания абонентских линий, составил при использовании высококачественных микрофонов —14÷+12 дБ, а с угольными микрофонами —22 ÷+14 дБ [28] по отношению к среднему значению.

Возможности применения ограничителей максимального уровня и эффект от этого, в том числе для борьбы с переходными разговорами рассмотрены ниже в соответствующих главах.

Для слабо развитых телефонных сетей, где аппаратура уплотнения, тем более многоканальная, не нашла еще распространения, ограничивающее влияние ее на выходной уровень можно не учитывать. В сетях такого рода параллельный пробег линий на значительные расстояния менее вероятен, чем в развитых сетях; в связи с этим меньше и вероятность переходных разговоров, хотя одновременно меньше и линейные электрические помехи — главный враг внятных переходов. Во всяком случае, в этих сетях, особенно на линиях большой протяженности, значительно более допустимы повышенные уровни на выходе ТА.

Для районированных сетей общего пользования наряду с эквивалентом затухания следовало бы нормировать и уровень на выходе телефонного аппарата.

2.9. ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕЛЕФОНА

Выше показано, что в условиях электрических линейных помех разборчивость переходных разговоров не зависит от чувствительности телефона, а потому величину $R_т$ можно повышать, не опасаясь увеличения внятных переходов. Рассмотрим, каковы рациональные пределы повышения $R_т$ в условиях ограничивающего влияния помех различного рода. Примем, что линия достаточно длинная и величиной $B_{тр}$ можно пренебречь. Следует остановиться на двух характерных вариантах:

1. Задан коэффициент передачи (чувствительность) $R_{м.т}$ микрофона и телефона, например с учетом ограничений со стороны помех от местного эффекта, переходных разговоров или самовозбуждения, и решается вопрос о том, как распределить заданную величину $R_{м.т}$ между микрофоном и телефоном. В этом случае с

увеличением $R_т$ растут только электрические помехи. Преобладание этих помех имеет место при

$$\left.\begin{aligned} B_{э.п.з} &\gg (B_{а.з}\,(+)\,B_{м.э}); \\ B_{э.п.з} &= (B_{а.з}\,(+)\,B_{м.э}) + \Delta B. \end{aligned}\right\} \qquad (2.38)$$

Отсюда с учетом (2.3), (2.4), (2.6) предельно целесообразная величина $R_{т.ц}$, выше которой разборчивость речи увеличиваться не будет, выразится уравнением

$$R_{т.ц} = [(B_а - a_з)\,(+)\,(B_а - a_ш - a_{м.э} + R_{м.т})] - (B_{э.п.л} - a_{пр}). \qquad (2.39)$$

Ввиду того, что ограничивающее влияние помех от местного эффекта больше, чем переходных разговоров, примем в (2.39) $R_{м.т} = R_{м.т.ц}$, выбранному ранее для условий преобладания помех от местного эффекта. Предельно целесообразная величина $R_{м.т.ц}$ при этом достигается при $B_{м.э} = B_{а.з} + \Delta B$. Тогда, если $\Delta B = 6$ дБ, из (2.39) получим

$$R_{т.ц} = [(B_а - a_з)\,(+)\,(B_а - a_з + 6\ дБ)] + 6\ дБ - (B_{э.п.л} - a_{пр}) = \\ = (B_а - a_з) - (B_{э.п.л} - a_{пр}) + 13\ дБ. \qquad (2.40)$$

Когда в (2.39) $B_{а.з} \gg B_{м.э}$, уравнение это приводится к виду

$$R_{т.ц} = (B_а - a_з) + \Delta B - (B_{э.п.л} - a_{пр}). \qquad (2.41)$$

Сопоставляя два последних уравнения, можно сделать вывод, что при учете влияния местного эффекта (2.40) $R_{т.ц}$ выше на 7 дБ, чем когда $B_{м.э} \ll B_{а.з}$ (2.41), что на первый взгляд кажется неза-

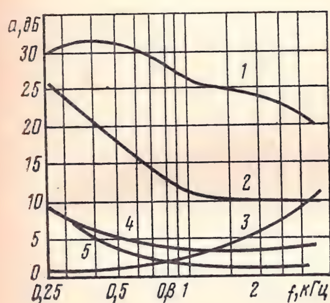


Рис. 2.12. Частотные характеристики затуханий, принятые при расчетах: 1 — $a_{м.э}$ (незначительное рассогласование); 2 — $a_{м.э}$ (сильное рассогласование); 3 — $a_з$; 4 — $a_{пер}$; 5 — $a_{пр}$

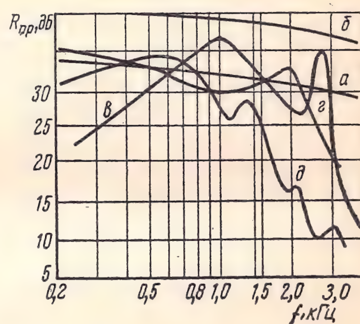


Рис. 2.13. Предельно целесообразные частотные характеристики коэффициентов приема, вычисленные для различных условий и характеристика $R_{пр}$ с телефоном ТА-4

кономерным. Однако следует учесть, что в первом случае $R_{м.т.ц}$ выбирается при условии, что помехи от местного эффекта на 6 дБ выше акустических. Тогда кажущееся противоречие снимается.

Частотные характеристики различного рода затуханий, используемых при расчетах в данной главе, приведены на рис. 2.12.

Результаты расчета $R_{пр.ц}$ при уровне акустических шумов 60 дБ и электрических помех 0,3 мВ псоф. приведены на рис. 2.13 Кривая *а* соответствует ур-нию (2.40), кривая *б* — ур-нию (2.41). На том же рисунке нанесены характеристики $R_{пр}$ аппарата ТА-65 с телефоном ТА-4 (кривая *в*) [14]. Сопоставление этой характеристики с предельно целесообразными (кривые *а* и *б*) позволяет установить, что в заданных условиях имеются возможности повышения $R_{пр}$, особенно в области нижних и верхних частот для случая *б*. При акустических шумах более высокого уровня характеристики $R_{пр.ц}$ пойдут еще выше и запас на повышение усиления соответственно увеличится. Наоборот, при больших напряжениях электрических помех он соответственно снизится. В этих условиях выгоднее повышать $R_{пер}$ за счет $R_{пр}$, а не наоборот.

2. Задана величина $R_{пер}$, например, с учетом ограничений за счет внятных переходов, технических возможностей, источников питания или норм на выходные уровни. На величину $R_{м.т}$ ограничений не накладывается и она увеличивается вместе с возрастанием $R_т$. При этом увеличиваются также $B_{м.э}$ и $B_{э.п.з}$. Преобладание помех, зависящих от $R_т$, достигается при

$$(B_{м.э}\,(+)\,B_{э.п.з}) \gg B_{а.з}; \quad (B_{м.э}\,(+)\,B_{э.п.з}) = B_{а.з} + \Delta B. \qquad (2.42)$$

Отсюда с учетом (2.3), (2.4), (2.6)

$$R_{т.ц} = (B_а - a_з) + \Delta B - [(B_а - a_ш - a_{м.э} + R_м)\,(+)\,(B_{э.п.л} - a_{пр})]. \qquad (2.43)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой сумму уровней помех от местного эффекта и электрических линейных помех на зажимах телефона. Если электрические помехи очень малы по сравнению с $B_{м.э}$, $R_{т.ц} = a_ш + a_{м.э} - a_з - R_м + \Delta B$. Для микрофона давления $a_ш$ мало, а при неплотном прижатии телефона к уху $a_з$ мало, тогда $R_{т.ц} = a_{м.э} - R_м + \Delta B$.

Примем в (2.43) $R_м = R_{м.д}$, где $R_{м.д}$ предельно допустимая величина, при которой уровень ощущения переходных разговоров в условиях, когда $a_п = 60$ дБ и $B_{э.п.л\Sigma} = 0{,}3$ мВ псоф. (см. рис. 2.7), составляет $E = -2$ дБ. Величину $a_{м.э}$ возьмем для случая большого рассогласования цепи местного эффекта. Результаты расчета по (2.43) представлены на рис. 2.13 в виде кривой *г*. Аналогичная характеристика, но при заданной чувствительности микрофона МК-16Т, представлена кривой *д*. Эти характеристики позволяют сделать заключение, что влияние местного эффекта и здесь проявляется в ограничении чувствительности в области верхних частот. При бо́льших величинах $a_{м.э}$ характеристики пойдут выше и будут приближаться к кривой *б*.

По своей форме предельно целесообразные характеристики $R_{пр.ц}$, если не учитывать случаи значительного рассогласования цепи местного эффекта, близки к прямолинейным. Согласно существующим нормам [24] частотные характеристики коэффициента приема не должны выходить за пределы изображенной на

рис. 2.14 области. Эти нормы допускают для характеристик $R_т$ как повышающуюся, так и спадающую тенденцию.

Частотные характеристики $R_{пр}$ ряда современных телефонных аппаратов приведены на рис. 2.15. Обращает на себя внимание высокая чувствительность на прием шведского аппарата Dialog [31, 14] и почти безупречная равномерность его характеристики в области нижних и средних частот диапазона.

Согласно нормам МККТТ эквивалент затухания национальной системы на прием с затуханием абонентской линии 4,3 дБ не дол-

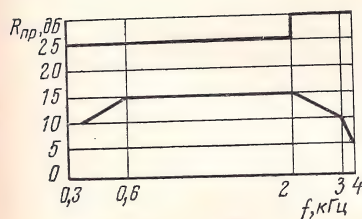


Рис. 2.14. Частотные характеристики коэффициентов приема по ГОСТ

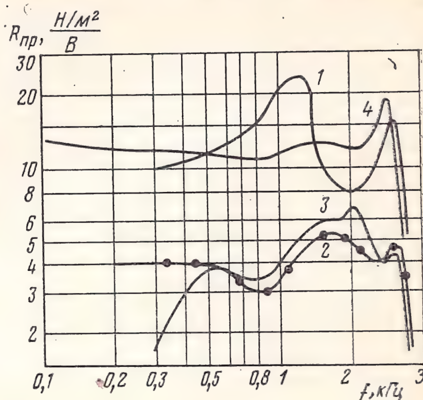


Рис. 2.15. Частотные характеристики коэффициентов приема некоторых телефонных аппаратов:

1 — ТАУ-3, ТАУ-4; *2* — Белл-500 (США); *3* — К-701 (США); *4* — Dialog (Швеция)

жен превышать 1,2 дБ [32, 33]. Статистические исследования на телефонных сетях СССР показывают, что в 97% случаев эквивалент затухания хуже этих норм (больше) на 4 дБ, а в 95% случаев — на 0,4 дБ [33] ввиду недостаточной чувствительности двухполюсных электромагнитных телефонов. Аппараты с дифференциальным телефоном удовлетворяют этим требованиям, но они значительно дороже. В новом телефонном аппарате ТА-75 применен дифференциальный электромагнитный телефонный капсюль типа ТКЭД-8, что позволяет значительно повысить электроакустические свойства аппарата на прием. В результате ТА-75 (микрофон МК-16) обеспечивает при уровне шума 60 дБ слоговую разборчивость 90%, что означает уверенную оценку качества «отлично».

Для приближения эквивалента затухания приема телефонных аппаратов общего применения с двухполюсными телефонами к существующим нормам в [33] предложено снизить затухание схемы на прием за счет увеличения затухания на передачу. Последнее достигается изменением соответствующих коэффициентов трансформации и выбором частоты согласования таким образом, чтобы

обеспечивалось повышение громкости приема. Это дает возможность увеличить эквивалент затухания на недостающий 1 дБ. Повышение индуктивности трансформатора позволяет повысить коэффициент приема в области нижних частот, что дополнительно увеличивает эквивалент затухания по громкости на 1—2 дБ.

Для условий, где необходимо увеличение коэффициента приема, целесообразно применение усилителя на транзисторах. Целесообразность включения усилителя на приеме, а не на передаче объясняется еще и тем, что в последнем случае абонент, управляющий усилителем, не имел бы возможности контролировать эффект от его включения. Усилитель приема применен в телефонном аппарате типа ТАН-У-74, предназначенном для условий, когда громкость приема недостаточна, например при междугородных переговорах, для людей с ослабленным слухом. Аппарат можно также использовать в районах, где протяженность соединительных (и абонентских) линий выходит за пределы, предусмотренные нормами. При положении регулятора «Максимальная громкость» аппарат обеспечивает эквивалент затухания не более —1,2 дБ. В отличие от аналогичных аппаратов усилитель приема размещен в ушной раковине микротелефонной трубки, снаружи которой располагается сегмент регулятора громкости.

2.10. РАБОТА АППАРАТА НА КОРОТКИХ ЛИНИЯХ

Для работы аппарата на коротких линиях характерны следующие особенности:

а) возрастает влияние акустических шумов, проникающих из помещения передачи на приемный конец ($B_{тр}$);

б) увеличивается рассогласование цепи местного эффекта;

в) возрастает уровень речи на приеме.

Уровень ощущения речи при помехах $B_{тр}$ [см. (2.5)] выражается соотношением

$$E = (B_р - a_л + R_а) - (B_а - a_ш - a_л + R_а) = B_р - (B_а - a_ш).$$

Разборчивость речи определяется в этом случае разностью речи и шума, воспринимаемых микрофоном, и может быть увеличена только путем повышения шумозащищенности микрофона.

Баланс цепи местного эффекта обычно рассчитывают на входное сопротивление электрически длинной линии. При короткой линии этот баланс нарушается. При очень короткой линии аппарат оказывается нагруженным на входное сопротивление второго аппарата, которое по модулю и фазе отличается от $Z_л$. В результате возрастают помехи от местного эффекта и опасность самовозбуждения.

В соответствии с существующими нормами [29, 14] рабочее затухание местного эффекта при абонентской линии, равной нулю, должно быть не ниже 17 дБ, в то время как для линии с большим затуханием оно выше, по крайней мере, на 9 дБ. Способы борьбы с местным эффектом, в том числе и на коротких линиях, рассмот-

рены в гл. 1. Применение автоматических регуляторов уровня чаще всего в виде варисторов, сопротивление которых управляется током питания, поступающим из линии и зависящим от ее длины, позволило, например, в аппарате Белл-500 повысить затухание местного эффекта на 5—9 дБ во всем диапазоне частот, снизить коэффициент передачи в области верхних частот на 2—3 дБ, а коэффициент приема на 1—3 дБ. Таким образом, уровень помех от местного эффекта [см. (2.6)] снижается под влиянием АРУ на верхних частотах диапазона на 8—15 дБ. Это снижает возможность самовозбуждения аппарата, которое возникает, как правило, в области верхних частот.

При затуханиях линии, близких к нулю, громкость приема может возрасти до неприемлемых для человеческого уха пределов. Во избежание перегрузки уха в телефонах всех современных аппаратов применяют ограничители больших амплитуд — фриттеры, которые представляют собой обычно два параллельно-встречно включенных диода, подключенных к входу телефона. Диоды подбираются таким образом, чтобы шунтирующее действие их проявлялось только при напряжениях, выше заданного. Для разных телефонных аппаратов пороговое напряжение, соответствующее началу ограничения, составляет 0,4—1 В по входу аппарата [14]. Порог ограничения зависит от чувствительности аппарата на прием. Для аппаратов с повышенной чувствительностью он должен быть ниже. Так, например, в аппаратах с усилителями приема (ТАУ-3 и ТАУ-4) он составляет всего 14 мВ.

Список литературы

1. **Быков Ю. С.** Современные теории разборчивости речи. — «Труды НИИС СВ», 1948, № 1.
2. **Сборник** статей. — «Труды Академии». Л., ВКАС, 1951, № 29—30 и 1954, № 40.
3. **Иофе В. К., Сапожков М. А.** Об оптимальных частотных характеристиках. — «Труды комиссии по акустике АН СССР», 1951, № 2.
4. **Быков Ю. С.** Советские работы по теории разборчивости. — «Известия АН СССР», серия физическая, 1949, т. 13, № 6.
5. **Быков Ю. С.** Исследование пиковых уровней русской речи. — «Труды комиссии по акустике АН СССР», 1953, № 7.
6. **Fletcher H.** A Method of Calculating Hearing Loss for Speech from a Audiogram.—«JASA», 1950, v. 22, N 1.
7. **Покровский Н. Б.** Расчет и измерения разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962. 391 с.
8. **Fletcher H.** Speech and Hearing, 1929.
9. **Полковский И. М., Ткаченко А. Д.** Электроакустические тракты с обратной связью. М., «Связь», 1969, 224 с.
10. **French N., Steinberg J.** Factors governing the Intelligibility of Speech Sounds.—«JASA», 1947, v. 19, N 1.
11. **Быков Ю. С.** Расчет каналов связи в сильных шумах. — «Труды секции электроакустики и звукозаписи ВНТО им. Попова», 1948.
12. **Сапожков М. А.** Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., «Связь», 1963. 450 с.
13. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.

14. **Губренко И. М., Кучумов Е. В.** Телефонные аппараты АТС. М., «Связь», 1968. 284 с.
15. **Карагодина И. Л.** Городские и жилищно-коммунальные шумы и борьба с ними. М., «Медицина», 1964.
16. **Федорович В. Н., Эльсниц А. Г.** Научно-технический сборник НИИ МРТП, 1955, № 1, 2.
17. **Покровский Н. Б.** Разработка методов определения оптимальных характеристик трактов связи. Л., ВКИАС, 1955.
18. **Гроднев И. И.** Военно-полевые кабели связи. М., Воениздат, 1948.
19. **Финклер И. Е.** Электроакустические характеристики телефонных трактов. М., Связьиздат, 1961. 131 с.
20. **Вахрушева Е. Б.** Критерии субъективной оценки качества передачи речи при телефонном разговоре. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС. 1970, вып. 5.
21. **Финклер И. Е.** Анализ внятного переходного разговора, волюма речи и шума в тракте АТС. Канд. диссертация. Л., 1968. 130 с.
22. **Покровский Н. Б.** Телефония. Теория и техника передачи речи. Л., Изд. ВКАС, 1970. 285 с.
23. **Голубцов И. Е., Сасенко С. М.** Нормы затухания на местных телефонных сетях. М., «Связь», 1961.
24. **ГОСТ** 7153—68. Аппараты телефонные общего применения. Методы испытаний.
25. **Пленарная** ассамблея МККТТ. Женева, 1956.
26. **Материалы** МККТТ по вопросу 17, 12 ИК. Документ № 40, окт. 1958.
27. **Subrizi V.** Bell Labor. Record, 1953, N 3.
28. **Richards D. L.** Electronics Record, Reprinted from Proceedings the Inst. of Electrical Eng., 1964, v. 3, N 5.
29. **ГОСТ** 9686—68. Аппараты телефонные общего применения. Технические требования.
30. **Иофе В. К.** О предельной чувствительности микрофона — преобразователя. — «ЖТФ», 1938, т. 8, № 10.
31. **Boerd A.** Transmission characteristics of the Dialog. — «Ericson Review», 1964, v. XLI, N 4.
32. **Голубая** книга МККТТ, т. III, 1964.
33. **Литвак И. М., Голубович А. Б., Нахмейн Л. В.** О проектировании разговорных цепей схемы телефонного аппарата. — «Вопросы радиоэлектроники», серия «Техника связи», 1969, вып. 4.

3

ДИНАМИЧЕСКИЕ И АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

3.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Если на вход системы подано воздействие с мгновенным значением $x=A\sin\omega t$, то на выходе получим эффект $z=kA\sin(\omega t\pm\varphi)$, где A — амплитуда воздействия, k и φ соответственно модуль и фаза коэффициента передачи системы. В линейных системах отношение $k=z/x$ зависит только от ω. В нелинейных системах оно зависит также от величины амплитуды входного воздействия A.

Линейные системы характеризуются наличием простой пропорциональности между входным воздействием и выходным эффектом, т. е. постоянством коэффициента передачи на каждой данной частоте и его независимостью от величины x, подаваемой на вход устройства.

$$k = z/x = \text{const}. \tag{3.1}$$

При $k=\varphi(x)$ система нелинейна.

Основным свойством линейных цепей, имеющим большое значение для многих расчетных методов этих цепей, является принцип суперпозиции. Пусть цепь описана простым алгебраическим уравнением $y=ax$. Если на входе линейного устройства действует сумма сигналов $x=x_1+x_2$, то на выходе будет $y=ax=a(x_1+x_2)=$ $=y_1+y_2$, т. е. действие каждого слагаемого независимо. Отклик линейной системы на действие суммы сигналов равен сумме откликов на действие каждого сигнала в отдельности. В этом и состоит принцип суперпозиции.

По отношению к нелинейным системам данный принцип неприменим. Возьмем для примера устройство с квадратичной характеристикой $y=ax^2$. Пусть на это устройство действуют раздельно сигналы x_1 и x_2. Тогда $y_1=ax^2{}_1$, $y_2=ax^2{}_2$. При одновременном действии на устройство сигналов x_1 и x_2 эффект на выходе будет $y=a(x_1+x_2)^2=ax^2{}_1+ax^2{}_2+2ax_1x_2\neq y_1+y_2$, т. е. квадрат суммы не равен сумме квадратов. Поэтому было бы неправильным при определении, например, суммарного уровня шума на выходе нелинейного элемента определить сначала выходные уровни в частотных полосах, а затем просуммировать их, как это делается при расчете линейных систем. Приходится учитывать эффект от совместного действия всех компонентов сложного сигнала, действующих на входе нелинейного устройства одновременно.

3.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ДИНАМИЧЕСКИХ И АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

В радиотехнике под динамическими характеристиками зачастую понимают нагрузочные характеристики, чтобы отличить, таким образом, изменившуюся под влиянием включения нагрузки кривую, выражающую зависимость между сеточным напряжением и анодным током. В [3] термин динамический относится в отличие от установившегося режима к переходным процессам. В [7] под динамическими характеристиками понимается в отличие от амплитудных зависимость между мгновенными значениями величин на входе и выходе нелинейного устройства; амплитудные характеристики выражают зависимость между эффективными значениями сигналов. Это понятие положим в основу дальнейшего изложения материала.

Иногда динамические характеристики очень незначительно отличаются от амплитудных, и поэтому при анализе и расчетах могут быть заменены ими, что существенно упрощает дело, по-

скольку получение динамических характеристик как экспериментальное, так и аналитическое в большинстве случаев является процессом сложным и трудоемким. Однако такая замена возможна не всегда. Амплитудная характеристика не дает никакой информации о четных гармониках, а потому для гармонического анализа не всегда пригодна. В радиотехнике нелинейные элементы являются неотъемлемой частью ряда важнейших функциональных узлов; на их действии основаны специфические процессы, связанные с преобразованием спектров частот, которые без нелинейных устройств не могут быть осуществлены. В этом случае анализ и расчеты базируются на использовании динамических характеристик.

При расчетах разборчивости речи в низкочастотных телефонных и других трактах главный интерес представляет зависимость между действующими значениями речевых составляющих на входе и выходе, выражаемая амплитудной характеристикой. Продукты нелинейности здесь рассматриваются обычно как помеха. Распределение этих помех по частотному диапазону может быть изучено или экспериментально, или на основе анализа динамических характеристик.

Амплитудные характеристики могут выражать зависимости:

между суммарным выходным эффектом и величиной синусоидального входного сигнала;

то же, но при подаче на вход сложного сигнала, например речевого или шумового;

между действующими значениями основного тона на выходе и синусоидального воздействия на входе;

между действующими значениями отдельных частотных составляющих на выходе и сплошного (речевого или шумового) спектра на входе;

то же, но при подаче на вход одного-двух синусоидальных колебаний (амплитудные характеристики гармоник и комбинационных частот).

В зависимости от решаемой задачи используется тот или иной вид амплитудной характеристики.

3.3. АППРОКСИМАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ (АМПЛИТУДНЫХ) ХАРАКТЕРИСТИК

Динамические (амплитудные) характеристики могут быть заданы аналитически, если известен математически физический закон протекания процессов в нелинейном элементе, или графически на основании экспериментальных данных. В последнем случае аналитическое выражение ищется путем аппроксимации имеющегося графика или табличных данных. Аппроксимация сводится к отысканию по возможности простого математического выражения, наиболее близко соответствующего экспериментальной кривой. Задачу математической аппроксимации характеристик можно раз-

бить на две части: выбор аппроксимирующей функции и определение ее коэффициентов.

В большинстве случаев динамические характеристики с достаточной для практики точностью могут быть выражены:

а) степенным полиномом

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \ldots + a_n x^n, \tag{3.2}$$

б) экспоненциальным полиномом

$$y = a_1 e^{b_1 x} + a_2 e^{b_2 x} + \ldots + a_q e^{b_q x}, \tag{3.3}$$

в) тригонометрическим полиномом

$$y = A_0 + A_1 \cos(x + \varphi_1) + A_2 \cos(2x + \varphi_2) + \ldots, \tag{3.4}$$

г) степенной функцией

$$y = kx^n. \tag{3.5}$$

Основной задачей анализа нелинейных цепей в установившемся режиме является определение частот, амплитуд, а иногда и фаз составляющих выходного спектра, а также характера изменения их при изменении величины входного воздействия. Для сложных сигналов с большим числом составляющих задача исследования нелинейных цепей зачастую сводится к изучению изменения статистического распределения этих сигналов под влиянием нелинейности и характера изменений огибающей процесса.

В ряде случаев путем применения графо-аналитического метода, сводящегося к построению по заданной динамической характеристике графика периодической функции на выходе и ее разложению на составляющие, например, по способу трех или пяти ординат, динамическая характеристика может быть аппроксимирована тригонометрическим рядом и таким образом сразу определен спектральный состав выходного сигнала. Такой метод применим только для простых одиночных синусоидальных сигналов на входе; при сложных сигналах графо-аналитическое решение чрезвычайно усложняется.

Наличие математического выражения позволяет ту же задачу решить аналитически, подставив выражение для входного сигнала в уравнение кривой. Аналитическому исследованию доступен более широкий круг задач; с его помощью могут быть изучены процессы в нелинейных системах при сложных входных сигналах.

Для определения коэффициентов аппроксимирующих уравнений по их графикам могут быть применены несколько способов: метод выравнивания, метод выбранных точек, метод наименьших квадратов, подробно описанные, например, в [2].

Аппроксимация характеристик, выраженных степенной функцией $y=kx^n$ (рис. 3.1*а*), и нахождение численных значений k и n осуществляется довольно просто путем построения графика функции в равнологарифмическом масштабе по осям x и y. При этом характеристика $\lg y = \lg k + n \lg x$, или в децибеллах $10 \lg y = 10 \lg k + n\, 10 \lg x$, представляет собой прямую линию (рис. 3.1*б*),

наклоненную к оси x под углом $\lg y/\lg x = \operatorname{tg}\alpha = n$. При $n=1$ система линейна, $\alpha=45$.

Величина n представляет собой графически крутизну характеристики, а величина $c=\lg k$ — логарифмическую чувствительность или уровень на выходе при входном воздействии, равном единице. Величина $k=y/x^n$. При одинаковых n и разных c графики идут параллельно (рис. 3.1*в*).

Степенная функция $y=kx^n$, если показатель степени n — целое число, является частным случаем степенного полинома (3.2). Если же n — дробное число, функцию эту при $n>1$ путем математических преобразований приводят зачастую к форме степенного полинома. Это можно сделать, например, при помощи ряда Тейлора. Для окрестности точки U_0 на динамической характеристике

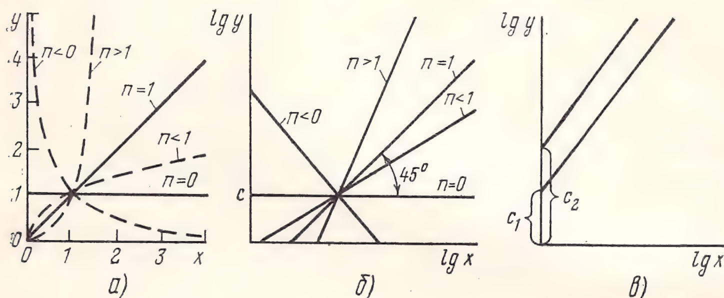


Рис. 3.1. Графическое изображение степенной функции $y=x^n$

$$y = a(U_0 + x)^n.$$

Ряд Тейлора для этой функции имеет вид

$$y = aU_0 + a\,n\,U_0^{n-1}x + \frac{1}{2}an(n-1)U_0^{n-2}x^2 + $$
$$+\frac{1}{3!}an(n-1)(n-2)U_0^{n-3}x^3 + \ldots$$

Данное уравнение можно записать в виде

$$y = a(a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \ldots),$$

где $a_0=U_0$; $a_1=nU_0{}^{n-1}$; $a_2 = \frac{n(n-1)}{2}U_0^{n-2}$; $a_3 = \frac{n(n-1)(n-2)}{1\cdot 2\cdot 3}U_0^{n-3}$.

Преобразование с помощью ряда Тейлора допустимо только в случае непрерывности функции в окрестностях точки U_0 и наличия всех производных. Кроме того, оно предполагает перенесение рабочей точки из нуля в U_0, что для значительного числа элементов телефонного тракта не всегда возможно. В случае, когда рабочую точку перенести нельзя, можно применить разложение в

ряд Маклорена:

$$f(0) + f'(0)x + f''\frac{x^2}{2!} + f'''\frac{x^3}{3!} + \ldots$$

Характеристика полупроводникового диода приближенно выражается уравнением $i = a(e^{bx} - 1)$, где a и b — постоянные. Разложение в ряд Маклорена будет иметь вид

$$i = a\left(bx + \frac{bx^2}{2} + \frac{bx^3}{2 \cdot 3} + \ldots\right).$$

Разложение Маклорена не дает результата для функции $y = x^n$, если n — дробь или целое число с дробью, что характерно, например, для угольного микрофона. По просьбе автора данной работы эта функция была разложена А. А. Бобковым в степенной ряд с кратными единице целыми степенями типа ур-ния (3.2), свойства которого хорошо изучены и для которого известен гармонический ряд. Разложение проведено на основе теории приближений Чебышева (по способу наименьших квадратов) с помощью ЭВМ.

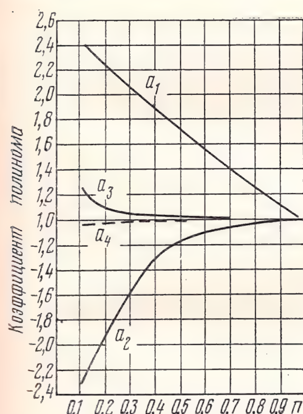


Рис. 3.2. Разложение функции $y = x^n$ в степенной ряд для n от 0 до 1

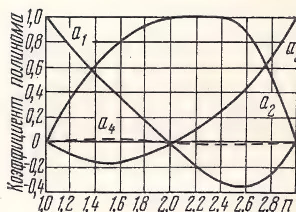


Рис. 3.3. Разложение функции $y = x^n$ в степенной ряд для n от 1 до 3

Выданная ЭВМ зависимость коэффициентов полинома от показателя степени n приведена в виде таблицы в приложении 1 и на рис. 3.2 и 3.3 соответственно для $n = 0 \div 1$ и $n = 1 \div 3$. Правильность решения проверена по очевидному соотношению, получающемуся из ур-ния (3.2) при $n = 1$. В этом случае сумма коэффициентов полинома $\Sigma a_i = 1$, что выполняется с достаточной точностью для всех n, за исключением единичных точек, которые были скорректированы при построении кривых.

3.4. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Решение большинства задач, связанных с гармоническим анализом сигнала на выходе нелинейного устройства, базируется на свойствах рядов Фурье. Коэффициенты a_n (четная косинусоидаль-

ная часть разложения) и b_n (нечетная синусоидальная часть) вычисляются обычно посредством интегрирования. Оно может оказаться довольно сложным, если исходная функция не задана в удобной аналитической форме. Однако $f(x)$ легко получить графическим способом без интегрирования, если известна форма периодического колебания на выходе нелинейного звена, пользуясь следующим соотношением:

$$f(x) = \frac{f(x) + f(-x)}{2} + \frac{f(x) - f(-x)}{2}.$$

Остановимся на двух важных свойствах периодического сигнала.

1. Если функция $f(x)$, имеющая период колебания 2π, такова, что $f(x+\pi) = f(x)$, то ее разложение содержит только четные гармоники. Необходимым и достаточным для этого является условие, чтобы функция имела период, равный половине периода, приме-

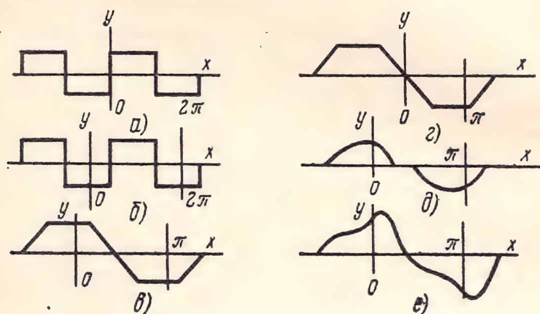


Рис. 3.4. Периодические функции, содержащие только нечетные гармоники

няемого для разложения Фурье. Например, ток на выходе двухполупериодного выпрямителя имеет частоту вдвое больше, чем на входе и содержит поэтому только четные гармоники основной частоты.

2. Если функция $f(x)$, имеющая колебания 2π, такова, что $f(x+\pi) = -f(x)$, то ее разложение в ряд Фурье содержит только нечетные гармоники. Необходимым и достаточным условием для этого является зеркальная симметрия, т. е. симметрия между двумя полуволнами периода функции. Примеры периодических кривых, содержащих только нечетные гармоники, приведены на рис. 3.4. Перенося начало координат вправо или влево, можно перевести функцию из разряда четных в разряд нечетных, но при этом она не теряет свойства содержать только нечетные гармоники, так как ее симметрия относительно оси абсцисс не меняется.

Любую функцию можно разбить на части, содержащие только четные и только нечетные гармоники на основании следующего тождества:

$$f(x) = \underbrace{\frac{f(x) + f(x+\pi)}{2}}_{\text{четные гармоники}} + \underbrace{\frac{f(x) - f(x+\pi)}{2}}_{\text{нечетные гармоники}}.$$

Приведенные выше теоремы об условиях наличия только четных или только нечетных гармоник даются без математического доказательства. С ним можно познакомиться, например, в [4]. Од-

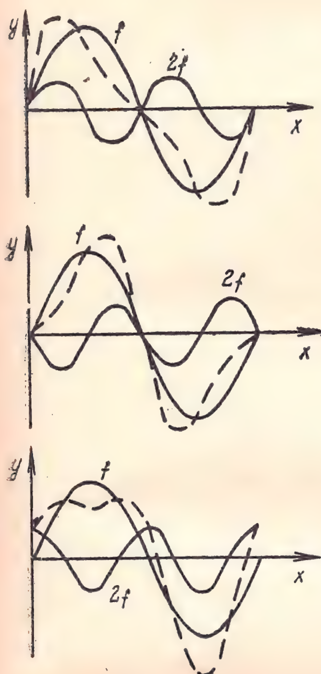


Рис. 3.5. Сложение основной составляющей и четных гармоник

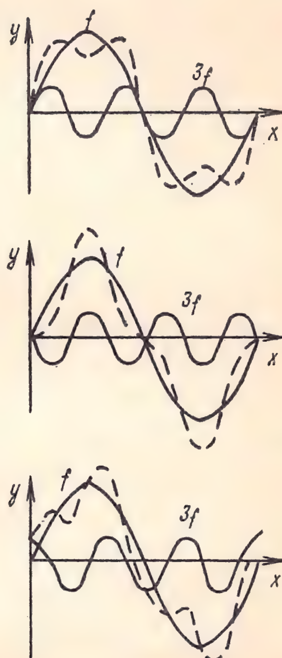


Рис. 3.6. Сложение основной составляющей и нечетных гармоник

нако простое графическое суммирование двух колебаний — основного и четной гармоники (рис. 3.5), а также основного и нечетной гармоники (рис. 3.6) — показывает, что наличие нечетной гармоники обусловливает одинаковое искажение обеих полуволн, при этом $f(x+\pi) = -f(x)$, а наличие четной гармоники приводит к нарушению тождества между полуволнами и нарушению равенства ординат, разделенных интервалами π.

В зависимости от сдвига фаз между основной частотой и гармониками эти искажения обусловливают ту или иную форму полуволн суммарного колебания, но отмеченные выше свойства их сохраняются. Таким образом, по внешнему виду периодического выходного сигнала на экране осциллографа можно судить о на-

личии в нем четных или нечетных составляющих или и тех и других.

Характеристики рассмотренного типа можно отнести к числу статических в том смысле, что они соответствуют заданной величине входного воздействия. Для того чтобы судить о том, как ведет себя система, когда амплитуда на входе меняется, надо иметь набор таких характеристик для разных амплитуд или для участков динамической характеристики с разным законом изменения нелинейности.

3.5. ПОЛУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СПЕКТРА НА ВЫХОДЕ ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Для аналитических целей динамическая характеристика чаще всего аппроксимируется степенным полиномом (3.2) ввиду простоты и наглядности преобразования его в ряд Фурье путем подстановки в уравнение выражения для исходного сигнала. Степенной полином при этом зачастую разделяется на два полинома — с четными и нечетными степенями. Для каждого из них могут быть получены по два тригонометрических ряда: при синусоидальном сигнале на входе $f(x)=B\sin x$ (нечетная функция) и при косинусоидальном сигнале $f(x)=a\cos x$ (четная функция).

Нечетному косинусоидальному степенному полиному

$$f(x)=a_0+a_1\cos x+a_3\cos^3 x+\ldots+a_q\cos^q x$$

соответствует гармонический ряд

$$f(x)=A_0+A_1\cos x+A_3\,3\cos x+\ldots+A_q\cos q\,x.$$

Общая расчетная формула для определения амплитуд составляющих выходного спектра

$$A_k=\frac{C_k^0}{2^{k-1}}\,a_k+\frac{C_{k+2}^1}{2^{k+1}}\,a_{k+2}+\frac{C_{k+4}^2}{2^{k+3}}\,a_{k+4}\ \ldots$$

Отдельные амплитуды можно вычислить по формулам:

$$A_1=a_1+\frac{3}{4}\,a_3+\frac{10}{16}\,a_5+\frac{35}{64}\,a_7;$$

$$A_3=\frac{1}{4}\,a_3+\frac{5}{16}\,a_5+\frac{21}{64}\,a_7;\quad A_0=a_0.$$

Нечетному синусоидальному степенному полиному

$$f(x)=b_1\sin x+b_3\sin^3 x+b_5\sin^5 x+\ldots$$

соответствует гармонический ряд

$$f(x)=B_1\sin x+B_3\sin 3x+B_5\sin 5x+\ldots$$

Амплитуды составляющих выходного спектра

$$B_1=b_1+\frac{3}{4}\,b_3+\frac{10}{16}\,b_5+\frac{35}{64}\,b_7+\ldots;$$

$$B_3=-\left[\frac{1}{4}\,b_3+\frac{5}{16}\,b_5+\right].$$

Четный косинусоидальный полином

$$f(x)=a_0+a_2\cos^2 x+a_4\cos^4 x+\ldots$$

преобразуется в гармонический ряд

$$f(x) = A_0 + A_2 \cos 2x + A_4 \cos 4x + \dots$$

При этом амплитуды составляющих выходного спектра будут

$$A_0 = a_0 + \frac{1}{2} a_2 + \frac{5}{16} a_4 + \frac{20}{64} a_6;$$

$$A_2 = \frac{1}{2} a_2 + \frac{1}{16} a_4 + \frac{15}{32} a_6;$$

$$A_4 = \frac{1}{4} a_4 + \frac{6}{32} a_6.$$

Для четного синусоидального степенного полинома

$$f(x) = b_0 + b_2 \sin^2 x + b_4 \sin^4 x + b_6 \sin^6 x + \dots$$

гармонический ряд имеет вид

$$f(x) = A_0 + A_2 \cos 2x + A_4 \cos 4x + A_6 \cos 6x + \dots$$

Амплитуды составляющих спектра на выходе будут:

$$A_0 = b_0 + \frac{1}{2} b_2 + \frac{6}{16} b_4 + \frac{20}{64} b_6;$$

$$A_2 = -\left[\frac{1}{2} b_2 + \frac{1}{2} b_4 + \frac{15}{32} b_6\right];$$

$$A_4 = \frac{1}{8} b_4 + \frac{6}{32} b_6.$$

Здесь приведены формулы для амплитуд гармонического ряда, соответствующих степенному полиному, ограниченному членом четвертой степени. Разложение для степеней вплоть до пятнадцатой можно найти в [6].

3.6. ПОЛУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Получение экспериментальной кривой динамической характеристики, если она не эквивалентна вольт-амперной, снятой на постоянном токе (например, для электронных ламп), или не совпадает с амплитудной характеристикой, дающей зависимости между действующими значениями сигналов, представляется довольно сложным. В [13] для этого рекомендован графо-аналитический метод. При измерении этим методом входной сигнал подается на горизонтальные пластины осциллографа, а выходной — на вертикальные. На экране появляется замкнутая фигура, которая представляет собой комплексную динамическую характеристику. Для линейной системы она имеет форму эллипса. Чем больше отклонение от эллиптической формы, тем больше нелинейность. Для получения динамических характеристик z_a и z_p можно воспользоваться формулами:

$z_a = (z_+ + z_-)/2$ и

$$z_p = \frac{z_+ + z_-}{2\sqrt{A^2/x^2 - 1}},$$

где z_+ и z_- — ординаты верхней и нижней частей динамической характеристики.

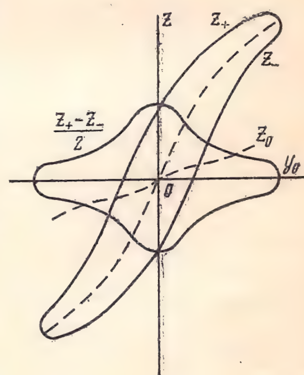


Рис. 3.7. Комплексная динамическая характеристика телефона

На рис. 3.7 приведена комплексная динамическая характеристика электромагнитного телефо-

на. Она представляет собой деформированный эллипс. Там же нанесены обе динамические характеристики z_a и z_p, а также суммарная кривая.

Динамическая характеристика в виде степенного полинома может быть получена также, если известен спектр на выходе, т. е. имеется тригонометрический полином или два полинома отдельно для четных и нечетных составляющих. При этом производится преобразование, обратное описанному в предыдущем разделе. Коэффициенты a_n и b_n четного и нечетного степенных полиномов могут быть вычислены, например, на основе теории кратных дуг [6]. Здесь приводятся готовые расчетные соотношения, позволяющие по известным амплитудам составляющих выходного сигнала (входной сигнал синусоидальный или косинусоидальный) определить коэффициенты a и b у слагаемых степенного полинома. Математическое выражение для динамической характеристики позволит провести анализ поведения системы при более сложных сигналах.

Для нечетного косинусоидального ряда

$$f(x) = A_1 \cos x + A_3 \cos 3x + A_5 \cos 5x + \dots$$

динамическая характеристика выразится полиномом

$$f(x) = a_1 \cos x + a_3 \cos^3 x + a_5 \cos^5 x + \dots$$

Коэффициенты a_1, a_3, a_5 могут быть выражены уравнениями

$$a_1 = 2^0 (A_1 - 3A_3 + 5A_5); \quad a_3 = 2^2 (A_3 - 5A_5).$$

Для нечетного синусоидального гармонического ряда

$$f(x) = B_1 \sin x + B_3 \sin 3x + B_5 \sin 5x + \dots$$

динамическая характеристика выражается уравнением

$$f(x) = b_1 \sin x + b_3 \sin^3 x + b_5 \sin^5 x + \dots$$

Коэффициенты этого полинома будут

$$b_1 = 2^0 (B_1 + 3B_3 + 5B_5); \quad b_3 = -2^2 (B_3 + 5B_5).$$

Четному косинусоидальному ряду

$$f(x) = A_0 + A_2 \cos 2x + A_4 \cos 4x + A_6 \cos 6x + \dots$$

соответствует динамическая характеристика

$$f(x) = a_0 + a_2 \cos^2 x + a_4 \cos^4 x + A_6 \cos^6 x + \dots$$

Ее коэффициенты определяются выражениями

$$a_0 = 2_0 (A_0 - A_2 + A_4 - A_6); \quad a_2 = 2^1 (A_2 - 4A_4 + 9A_6); \quad a_4 = 2^3 (A_4 - 6A_6).$$

Четному синусоидальному гармоническому ряду

$$f(x) = B_2 \sin 2x + B_4 \sin 4x + B_6 \sin 6x + \dots$$

соответствует динамическая характеристика вида

$$f(x) = (a_1 \cos x + a_3 \cos^3 x + a_5 \cos^5 x) \sin x.$$

Коэффициенты ее выражаются соотношениями

$$a_1 = 2^1 (B_2 - 2B_4 + 3B_6); \; a_3 = 2^3 (B_4 - 4B_6).$$

3.7. ТИПЫ ДИНАМИЧЕСКИХ (АМПЛИТУДНЫХ) ХАРАКТЕРИСТИК

Из всего многообразия динамических (амплитудных) характеристик, которыми описываются нелинейные устройства, можно выделить две большие группы.

Для одной из них характерно более быстрое нарастание величины выходного эффекта по сравнению с ростом входного воздействия. Изображенные в линейном масштабе, характеристики эти

представляют собой вогнутые кривые. В значительном числе случаев они могут быть аппроксимированы степенным полиномом с кратными целыми степенями или простой степенной функцией $y=kx^n$ с показателем степени $n>1$. Построенные в равнологарифмическом масштабе, они имеют крутизну больше единицы. К этому типу относятся характеристики расширителей динамического диапазона (экспандеров), а также ограничителей малых амплитуд — центральное ограничение, которое иногда называют ограничением по минимуму [5] или нижним ограничением. Крайним случаем здесь является характеристика с $n=\infty$, соответствующая полному срезанию всех составляющих ниже определенного порогового значения.

У другой группы характеристик рост выходного сигнала, наоборот, замедлен по сравнению с ростом входного. В линейном масштабе это дает выпуклую динамическую (амплитудную) ха-

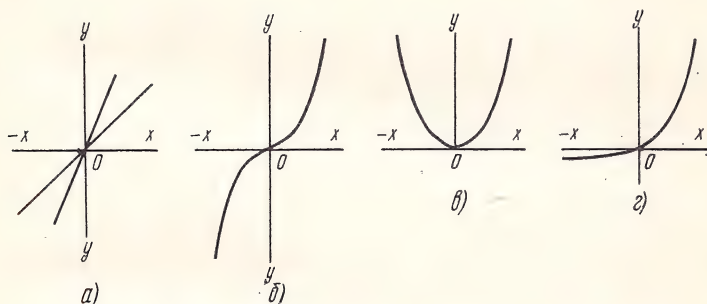


Рис. 3.8. Типы динамических (амплитудных) характеристик при ограничении малых амплитуд

рактеристику, которая может быть аппроксимирована степенной функцией типа $y=x^{1/p}$. Построенные в логарифмическом масштабе, эти характеристики имеют крутизну $n=1/p<1$, присущую компрессорам и ограничителям больших амплитуд, или, как их иногда называют, ограничителям по максимуму. Крайним случаем здесь является характеристика с $n=0$, т. е. прямая линия, параллельная оси абсцисс, соответствующая устройству, в котором выше порога ограничения выходной эффект не зависит от входного и остается постоянным по величине.

Некоторые типы динамических характеристик первой группы (ограничение малых амплитуд) приведены на рис. 3.8. График *а* представляет здесь изображенные в линейном масштабе динамические характеристики с различными коэффициентами передачи. Выходное напряжение пропорционально входному. Остальные графики рис. 3.8 относятся к нелинейным зависимостям.

Так же, как и при классификации периодических функций (см. выше), здесь могут быть два типа динамических характеристик: четные и нечетные; для четных $f(x)=f(-x)$, для нечетных $f(x)=$

$=-f(-x)$. Примером первых являются кривые рис. 3.8*в*, примером вторых — рис. 3.8*б*.

Нечетная функция может быть представлена степенным рядом по нечетным степеням x:

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \ldots$$

Четная функция выражается степенным рядом по четным степеням x; постоянная составляющая может не приниматься во внимание:

$$y = a_2 x^2 + a_4 x^4 + \ldots$$

Нечетная динамическая характеристика имеет положительную и отрицательную ветви, расположенные в первом и третьем квадрантах окружности. Четная динамическая характеристика отрицательной ветви не имеет, так как $-x$ в четной степени является положительной величиной; отрицательным значениям x соответствуют значения y, расположенные во втором квадранте.

Динамическая характеристика может иметь вид $f(-x) \approx 0$ или $f(-x) \leqslant f(x)$. Таковы характеристики вентилей (рис. 3.8*г*), к числу которых относятся, например, полупроводниковые диоды, практически не пропускающие тока в направлении запирания.

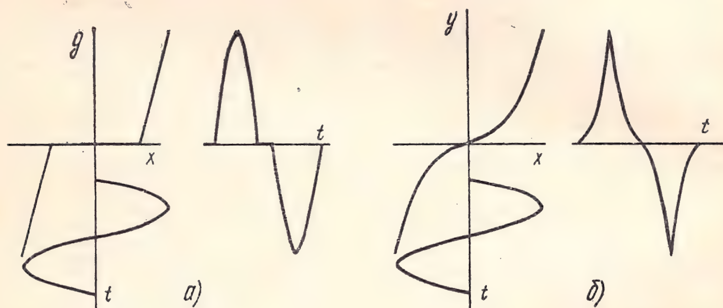


Рис. 3.9. Форма сигнала на выходе при ограничении малых амплитуд

Если динамическая характеристика имеет переменную крутизну, ее аппроксимируют двумя или несколькими прямыми линиями. От этого характеристика не становится линейной. Обычно линеаризация нелинейной характеристики состоит в выборе рабочей точки на прямолинейном участке ее. Это осуществимо тогда, когда имеется возможность управлять рабочей точкой, например, путем подачи смещения на сетку в электронной лампе. В электроакустических преобразователях и телефонном аппарате в целом такой возможности сместить рабочую точку на оптимальный, в смысле линейности, участок динамической характеристики нет и все явления приходится рассматривать около нуля.

Нелинейное звено с центральным (нижним) ограничением (при резком ограничении иногда говорят с «отсечкой») представ-

ляет собой амплитудный фильтр, не пропускающий амплитуды меньше определенного значения (рис. 3.9*а*) или пропускающий их с ослаблением (рис. 3.9*б*). Как видно из кривых рис. 3.9, при полной отсечке какую-то долю периода сигнал на выходе отсутствует. При большом ограничении проходят только вершины действующего на входе периодического сигнала. В зависимости от крутиз-

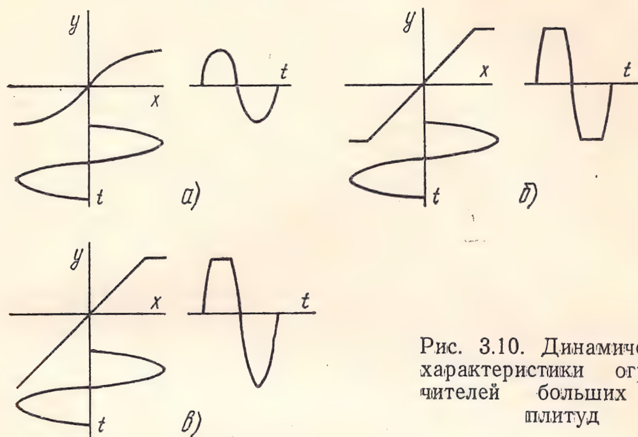


Рис. 3.10. Динамические характеристики ограничителей больших амплитуд

ны характеристики выше порога ограничения (отсечки) происходит, кроме того, большее или меньшее растягивание амплитуд этих вершин. Криволинейная динамическая характеристика дает пикообразную форму периодического сигнала на выходе (см. рис. 3.9*б*).

Для динамических характеристик второго типа характерно более медленное нарастание выходного сигнала по сравнению с входным, как это показано на рис. 3.10*а*. Периодический сигнал на выходе имеет при этом более тупую по сравнению с входным сигналом форму. Большие амплитуды иногда срезаются совсем. Ограничение может быть симметричным, когда срезаются вершины обеих полуволн (рис. 3.10*б*) и асимметричным при срезании одной полуволны (рис. 3.10*в*). Оно может быть резким и плавным. Ограничитель по максимуму может также рассматриваться как амплитудный фильтр, но пропускающий малые амплитуды и задерживающий большие.

Все сказанное выше относится и к амплитудным характеристикам, за исключением возможности аппроксимации некоторых типов их гармоническим рядом. На участке, где закон изменения амплитудной характеристики, построенной в логарифмическом масштабе, постоянен, она выражается прямой линией.

Измерения угольных микрофонов показали, что их амплитудные характеристики с достаточной точностью аппроксимируются двумя-тремя отрезками прямой линии с различным наклоном к осям координат. Различные типы амплитудных характеристик,

свойственные телефонному аппарату с угольным микрофоном, приведены на рис. 3.11.

При измерении амплитудных характеристик нижний предел величин обычно ограничивается возможностями измерительной аппаратуры и помехами. Однако область, соответствующая уровням наиболее слабых звуков речи, должна охватываться амплитудными характеристиками.

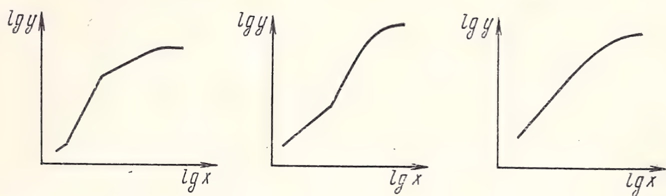


Рис. 3.11. Различные виды амплитудных характеристик угольного микрофона

Список литературы

1. **Атабеков Г. И. и др.** Теоретические основы электротехники, ч. II—III. М., «Энергия», 1966. 280 с.
2. **Филиппов Е.** Нелинейная электротехника. М., «Энергия», 1968. 503 с.
3. **Харкевич А. А.** Спектры и анализ. М., изд. технико-теоретической литературы, 1953.
4. **Гольдман С.** Гармонический анализ, модуляция и шумы. М., ИИЛ, 1951. 408 с.
5. **Андреев В. С.** Теория нелинейных электрических цепей. М., «Связь», 1952. 328 с.
6. **Заездный А. М.** Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. М., Госэнергоиздат, 1961.
7. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
8. **Грибов Э. Б.** Нелинейные явления в приемо-передающем тракте аппаратуры связи на транзисторах. М., «Связь», 1971. 247 с.

4

ХАРАКТЕР ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ МАЛЫЕ АМПЛИТУДЫ

4.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Ограничение малых амплитуд, которое часто, главным образом при резком ограничении, называют центральным, по своему влиянию на разборчивость речи превосходит все другие виды нелинейных искажений. Поэтому проявление нижнего ограничения, его воздействие на сигналы различного типа рассмотрены здесь с возможной для заданного объема книги полнотой.

4.2. ОГРАНИЧЕНИЕ ОДИНОЧНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО КОЛЕБАНИЯ

Пусть динамическая (амплитудная) характеристика аппроксимируется степенным полиномом

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots a_n x^n . \qquad (4.1)$$

Этим уравнением могут быть выражены характеристики значительного числа нелинейных звеньев низкочастотного тракта передачи, в том числе угольных микрофонов и телефонных аппаратов в целом, ряда нелинейных узлов, вводимых в тракт, например, для подавления помех и т. д. К этому типу могут быть приведены уравнения степенного типа с дробным и некратным единице показателем степени.

Если на вход системы, соответствующей уравнению (4.1), подается колебание $x = A \sin \omega t$, то на выходе при $n \leqslant 3$ будет

$$y = a_0 + a_1 A \sin \omega t + a_2 A^2 \sin^2 \omega t + a_3 A^3 \sin^3 \omega t = \left(a_0 + \frac{a_2}{2} A^2\right) +$$

$$+ \left(a_1 A + \frac{3 a_3 A^3}{4}\right) \sin \omega t + \frac{a_2}{2} A^2 \cos 2 \omega t - \frac{a_3}{4} A^3 \sin 3 \omega t. \qquad (4.2)$$

Из ур-ния (4.2) следует, что в результате нелинейных искажений происходит изменение величины постоянной составляющей и амплитуды основного колебания, а также появляются отсутствующие во входном сигнале гармоники с частотами 2ω и 3ω. При этом изменение постоянной составляющей и появление четной гармоники происходит за счет квадратичного члена ур-ния (4.1), а изменение амплитуды основной частоты и появление гармоники 3ω — за счет кубического члена.

Амплитуды гармоник связаны с постоянными коэффициентами исходного степенного полинома (4.1) строго определенными соотношениями. Это позволяет по результатам измерений величин основной частоты и гармоник определить коэффициенты a_1, a_2, a_3 в уравнении динамической характеристики нелинейного звена:

$$B_1 = a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3; \quad B_2 = \frac{1}{2} a_2 A^2; \quad B_3 = \frac{1}{4} a_3 A^3.$$

Постоянные коэффициенты a_2 и a_3 могут быть определены из двух последних уравнений. Коэффициент a_1 вычисляется по первому уравнению после определения a_3. Метод этот сравнительно прост и обладает высокой точностью [3]. В этом его преимущества перед описанными выше другими способами получения динамических характеристик. Непременным условием является частота тона измерительного генератора, так как уже при коэффициенте нелинейных искажений 0,5—1% могут появиться ошибки. Частоту генератора следует предварительно отфильтровать.

Коэффициент a_2 при квадратичном члене ур-ния (4.1) можно определить и по приращению постоянной составляющей, так как

$$\Delta I_0 = \frac{a_2}{2} A^2.$$

При расчетах разборчивости речи важнейшую роль играет воздействие нелинейного звена на основную частоту, подводимую к входу.

Если в ур-нии (4.1) слагаемое $ax^3=0$, то

$$y = a_0 + ax_1 + a_2 x^2 = \left(a_0 + \frac{a_2}{2} A^2\right) +$$

$$+ a_1 A \sin \omega t + \frac{a_2}{2} A^2 \cos 2 \omega t.$$

При этом основная составляющая передается без искажений:

$$y_{осн} = a_1 A \sin \omega t.$$

Если в ур-нии (4.1) кроме a_3x^3 равно нулю и слагаемое a_1x, то при синусоидальном входном сигнале выходной эффект не будет содержать основной частоты ω, а только постоянную составляющую и частоту 2ω, т. е. одни продукты нелинейности:

$$y = \left(a_0 + \frac{a_2}{2} A^2\right) + \frac{a_2}{2} A^2 \cos 2 \omega t. \tag{4.3}$$

Изменение основной составляющей ω, несущей передаваемую информацию, как при наличии в ур-нии (4.1) слагаемого a_2x^2, так и при отсутствии определяется только составляющими первой и третьей степеней этого уравнения:

$$y_{осн} = \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3\right) \sin \omega t. \tag{4.4}$$

В случае, когда в (4.1) можно пренебречь всеми слагаемыми, кроме кубического, искажения амплитуды основной частоты максимальны:

$$y = a_3 x^3 = \frac{3}{4} a_3 A^3 \sin \omega t - \frac{1}{4} a_3 A^3 \sin 3 \omega t. \tag{4.5}$$

На выходе такого устройства в отличие от квадратичного выделяется основная частота ω, подаваемая на вход; при этом амплитуда ее возрастает в $3A^3a_3/4$ раз по сравнению с величиной на входе. Кроме того, появляется гармоника утроенной частоты, равная по величине 1/3 амплитуды основного колебания на выходе. Отношение это является величиной постоянной, не зависящей от амплитуды входного воздействия. Следовательно, в данном случае амплитудная и динамическая характеристики идентичны. Они идут параллельно и отличаются друг от друга только по величине в $\sqrt{2}$ раз.

Таким образом, на зависимость $y_{осн}=f(x)$ влияют коэффициенты только нечетных составляющих исходного уравнения. Это свойство сохраняется при любом количестве членов степенного ряда.

Когда динамическая характеристика выражается степенной функцией $y=x^n$, что является наиболее простым способом аппроксимации, она может быть разложена в ряд по кратным степеням n (см. рис. 3.3 и приложение 1), т. е. приведена к виду, выражаемо-

му анализируемым ур-нием (4.1). Переход от степенного полинома к тригонометрическому ряду может быть осуществлен по формулам, приведенным в разд. 3.5. Полагая входное воздействие косинусоидальным $x=A\cos\omega t$, воспользуемся здесь следующими соотношениями для амплитуд частотных компонентов на выходе нелинейного звена: $A_1=a_1+\frac{3}{4}a_3+\frac{10}{16}a_5$, $A_3=\frac{1}{4}a_3+\frac{5}{16}a_5$, $A_2=\frac{1}{2}(a_2+a_4)+\frac{15}{32}a_6$. В результате расчета получаем зависимость от показателя нелинейности n коэффициентов A_1, A_2, A_3 тригонометрического ряда, изображенную на рис. 4.1. Для коэффициентов при гармониках выше 3ω величины A оказались пренебрежительно малы.

Из кривых на рис. 4.1 следует, что никакой пропорциональности между ростом показателя нелинейности и изменением амплитуды любой составляющей выходного спектра не существует, нет даже однозначной зависимости между ними. В пределах рассматриваемых величин от $n=1$ до $n=3$ амплитуда основной составляющей A_1 меняет знак и дважды переходит через нуль: при $n=2$ и при $n=2{,}6$. В этих точках коэффициент гармоник будет равен бесконечности. Амплитуда частоты 3ω, появляющаяся на выходе в результате нелинейности, более или менее заметно выражена только при $n\geqslant 2{,}5$; при $n=3$ величина $A_3=A_1/3$. Наоборот, амплитуда четной составляющей 2ω значительна почти во всем диапазоне рассматриваемых изменений n, за исключением краевых значений n, где она падает до нуля. Из рис. 4.1 следует, кроме того, что ряд Фурье, эквивалентный степенной функции $y=x^n$ при $n=1\div3$ практически не содержит гармоник с частотой выше 3ω.

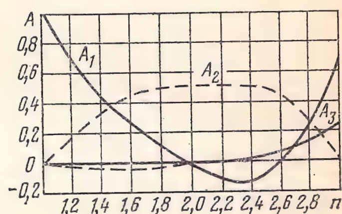


Рис. 4.1. Зависимость коэффициентов A_1, A_2, A_3 тригонометрического ряда от показателя степенной функции n

Как показали измерения (см. приложение 2), показатель нелинейности угольных микрофонов, находящихся в эксплуатации, в области звуковых давлений, соответствующих малым, а иногда и средним, уровням речи, может иметь значения от 1 до $2{,}5\div3$ и в очень редких случаях несколько превышать величину 3. Из рис. 4.1 видно, что в этих пределах значений n амплитуды гармоник могут существенно превышать амплитуду основной частоты. Поэтому в случае, когда интерес представляют характеристики нелинейного звена (НЗ) на основной частоте, подаваемой на вход НЗ, на выходе ее следует выделить фильтрами.

Пусть далее на нелинейное звено с характеристикой $y=ax^2$ действует синусоидальное колебание при наличии постоянной составляющей $x=I_0+I_1\sin\omega t$ (входы электронных ламп и транзисторов, цепь питания угольного микрофона и т. д.). Выходной эффект

при этом будет

$$y = a(I_0^2 + 2I_0I_1\sin\omega t + I^2\sin^2\omega t) =$$
$$= a[I_0^2 + 2I_0I_1\sin\omega t + I_1^2(1 - \cos 2\omega t)] =$$
$$= a[(I_0^2 + I_1^2) + 2I_0I_1\sin\omega t - I_1^2\cos 2\omega t].$$

Таким образом, в случае наличия постоянного тока нелинейное звено с квадратичной характеристикой, кроме эффекта выпрямления и появления гармоники с удвоенной частотой, что имеет место и при отсутствии постоянного тока, позволяет выделить на выходе также основное синусоидальное колебание с частотой ω, подводимое к входу. Его амплитуда при этом возрастает по сравнению с амплитудой основной частоты на входе в $2I_0$ раз. Аналогичный эффект усиления за счет постоянной составляющей имеет место в магнитной цепи электромагнитного телефона.

4.3. ИЗМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СИГНАЛАМИ ПРИ ИХ РАЗДЕЛЬНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНОЕ ЗВЕНО

Предположим, что на систему, описанную ур-нием (4.1), действуют разновременно, например, один за другим, два синусоидальных сигнала $A_1\sin\omega_1 t$ и $A_2\sin\omega_2 t$. Амплитуда основной составляющей первого сигнала на выходе будет $B_1 = a_1A_1 + \frac{3}{4}a_3A^3{}_1$, а второго $B_2 = a_1A_2 + \frac{3}{4}a_3A^3{}_2$. Их отношение

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{a_1A_1 + \frac{3}{4}a_3A_1^3}{a_1A_2 + \frac{3}{4}a_3A_2^3}.$$

Это отношение максимально, когда $a_1A \ll \frac{3}{4}a_3A^3$:

$$B_1/B_2 = (A_1/A_2)^3. \tag{4.6}$$

Это выражение справедливо как при наличии квадратичного члена в ур-нии (4.1), так и при его отсутствии. Из него следует, что в результате нелинейности происходит нарушение соотношения между амплитудами следующих друг за другом гармонических колебаний.

Если между входным воздействием и выходным эффектом существует зависимость $y = kx^n$ и $y_1/y_2 = (x_1/x_2)^n$, то разность уровней выходных сигналов составит $\beta_{y1} - \beta_{y2} = n(\beta_{x1} - \beta_{x2})$, т. е. будет в n раз больше, чем разность $\beta_{x1} - \beta_{x2}$ уровней входных сигналов.

Речь представляет собой чередование звуков различной интенсивности. В результате прохождения ее через НЗ с $n > 1$ динамический диапазон ее расширится, а при $n < 1$, наоборот, сузится. Под динамическим диапазоном понимается обычно разность меж-

ду уровнями интенсивности наиболее сильных и наиболее слабых составляющих речи.

Нелинейное звено с характеристикой вида $y=kx^3$ расширит динамический диапазон в 3 раза. Слабые звуки, имеющие, например, на входе уровни на 20 дБ ниже среднего уровня речи, будут на выходе ниже его на 60 дБ. Пиковые уровни, превышающие на входе средний уровень на 12 дБ, будут на выходе выше этого уровня на 36 дБ. В случае, когда на входе НЗ действуют в разное время звуки речи и шум (например, шум в паузах речи), отношение между их уровнями также изменится в n раз, если не принимать во внимание изменение их суммарных уровней в результате деформации спектров, обусловленной влиянием нелинейности.

4.4. ИЗМЕНЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СИГНАЛАМИ ПРИ СОВМЕСТНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ИХ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНОЕ ЗВЕНО

При совместном воздействии на систему, характеризуемую ур-нием (4.1), двух синусоидальных колебаний $x=A_1\sin\omega t+ +A_2\sin\omega_2 t$ для выходного сигнала будем иметь выражение

$$y=\left[a_0+\frac{a_2}{2}(A_1^2+A_2^2)\right]+\left(a_1A_1+\frac{3}{4}a_3A_1^3+\frac{3}{2}a_3A_1A_2^2\right)\sin\omega_1 t+$$

$$+\left(a_1A_2+\frac{3}{4}a_3A_2^3+\frac{3}{2}a_3A_1^2A_2\right)\sin\omega_2 t-\left(\frac{a_2}{2}A_1^2\right)\cos 2\omega_1 t-$$

$$-\left(\frac{a}{2}A_2^2\right)\cos 2\omega_2-a_2A_1A_2\cos(\omega_1+\omega_2)t+$$

$$+a_2A_1A_2\cos(\omega_2-\omega_1)t-\frac{a_3}{4}A_1^3\sin 3\omega_1 t-\frac{a_3}{4}A_2^3\sin 3\omega_2 t-$$

$$-\frac{3a_3}{4}A_1A_2^2\sin[(2\omega_2+\omega_1)t]-\frac{3a_3}{4}A_1A_2^2\sin[(2\omega_2-\omega_1)t]-$$

$$-\frac{3a_3}{4}A_1^2A_2\sin[(2\omega_1+\omega_2)t]-\frac{3a_3}{4}A_1^2A_2\sin[(2\omega_1-\omega_2)t]. \quad (4.7)$$

Проанализируем это уравнение с точки зрения воздействия нелинейности на амплитуды основных частот ω_1 и ω_2, подводимых к входу. Отношение между их амплитудами на выходе будет

$$\frac{B_1}{B_2}=\frac{a_1A_1+\frac{3}{4}a_3A_1^3+\frac{3}{2}a_3A_1A_2^2}{a_1A_2+\frac{3}{4}a_3A_2^3+\frac{3}{2}a_3A_2A_1^2}.$$

Когда величины a_1A_1 и a_2A_2 малы по сравнению с другими слагаемыми, влияние нелинейности максимально и выражение это

приводится к виду

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{A_1^3\left(1 + 2\,\dfrac{A_2^2}{A_1^2}\right)}{A_2^3\left(1 + 2\,\dfrac{A_1^2}{A_2^2}\right)},$$

если $A_1 = A_2$, то $B_1/B_2 = 1$. Это значит, что при равенстве амплитуд исходных сигналов отношение между ними на выходе не изменится. Пусть мощность одного сигнала много больше мощности другого:

$$1 \ll 2\,\frac{A_1^2}{A_2^2} \quad \text{или} \quad 1 \ll 2\,\frac{A_2^2}{A_1^2}.$$

Тогда отношение между сильным и слабым тоном на выходе будет, например, если $A \gg 2A^2{}_2$, $\frac{B_1}{B^2} = \frac{1}{2}\frac{A_1}{A_2}$, т. е. уменьшится в 2 раза по сравнению с A_1/A_2 на входе. Таким образом, при одновременном прохождении через такое нелинейное звено двух гармонических колебаний первоначальное соотношение их амплитуд может измениться максимально в 2 раза.

Как это показано выше, при характеристике нелинейного звена в виде степенного полинома [см. ур-ние (4.1)] максимальные изменения основной составляющей сигнала обусловлены слагаемым a_3x^3. Поэтому в дальнейшем при изучении влияния нелинейности этого типа на основные компоненты сигнала будет рассматриваться уравнение $y = ax^3$.

При прохождении через такое звено спектра $x = \sum\limits_{k=1}^{i} A_k \sin \omega_k t$ амплитуды основных составляющих на выходе можно найти из выражения [1]

$$B_l = a \lim_{T\to\infty} \frac{2}{T}\int\limits_0^T x^3 \sin \omega_l t\, dt = \frac{3\,a\,A_l}{4}\left[\sum_{k=1}^{i} 2\,A_k^2 + A_l^2\right], \qquad (4.8)$$

где $\sum\limits_{k=1}^{i} 2A^2{}_k$ — суммарная мощность спектра, исключая l-ю составляющую.

Отношение между основными составляющими спектра на выходе будет

$$\frac{B_l}{B_i} = \frac{A_l}{A_i}\,\frac{\sum\limits_{k=1}^{l} A_k^2 + A_l^2}{\sum\limits_{h=1}^{i} 2\,A_h^2 + A_i^2}.$$

Если спектр на входе равномерный и $A_l=A_i=A_k=A_h$, то отношение между основными компонентами его на выходе будет $\frac{B_l}{B_i}=\frac{A_l}{A_i}$. Если же одна из составляющих значительно превосходит по мощности суммарную мощность всех остальных, например $\sum_{k=1}^{i} 2A^2_k \ll A^2_l$ и $\sum_{h=1}^{i} 2A^2_h+A^2_i \approx 2A^2_l$, то $\frac{B_l}{B_i}=\frac{A_l}{A_i}$. Следовательно, и в том случае, когда на вход нелинейного звена с динамической характеристикой типа ур-ния (4.1) подается спектр, при равенстве составляющих спектра отношение между ними на выходе не изменится. Если же спектр неравномерный и мощность одного из его компонентов много больше суммарной мощности остальных, соотношение между ней и любой из остальных составляющих может измениться так же, как и при действии двух тонов, максимально в 2 раза. В зависимости от соотношения мощностей это изменение лежит в пределах 1—2 раз.

При прохождении через нелинейное звено отдельных звуков речи, отличающихся большой неравномерностью спектральных характеристик, произойдет некоторое сглаживание спектра вследствие увеличения слабых компонентов в пределе на 6 дБ. Аналогичным образом нелинейное звено действует и на шум.

Влияние изменений спектра сложных сигналов на их суммарный уровень невелико. Пусть разность уровней сильного и слабого сигналов на входе составляет, например, 12 дБ. Суммарный уровень сигналов при этом будет на 0,5 дБ выше уровня сильного сигнала и составит 12,5 дБ. На выходе это превышение составит 12 (+) 6=13 дБ, т. е. возрастет всего на 0,5 дБ. При бóльшей разности уровней сигналов указанное изменение будет еще меньше, а при малой разности изменения практически не будет. Поэтому при рассмотрении явлений, связанных с расширением динамического диапазона, можно в большинстве случаев не учитывать влияние деформации их спектров на суммарные уровни звуков речи, а также шумов.

4.5. ИЗМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОНА (СИГНАЛА)

Рассмотрим характер изменения динамической характеристики нелинейного звена для основного тона, подаваемого на вход, при появлении другого сигнала (назовем его дополнительным).

Для нелинейного устройства с динамической характеристикой, выражаемой ур-нием (4.1), амплитуда основного тона на выходе при отсутствии дополнительного тона равна в соответствии с (4.4)

$$B_1 = a_1 A_1 + \frac{3}{4} a_3 A_1^3.$$

При наличии дополнительного тона с амплитудой A_2 величина ее будет [см. ур-ние (4.7)]

$$B_1' = a_1 A_1 + \frac{3}{4} a_3 A_1^3 + \frac{3}{2} a_3 A_1 A_2^2.$$

Их отношение в случае большой нелинейности (малой величины $a_1 A_1$) будет

$$\frac{B_1'}{B_1} = \left(1 + 2\frac{A_2^2}{A_1^2}\right) = 1 + \Delta B. \quad (4.9)$$

Таким образом, приращение основного тона в результате действия дополнительного тона составит $\Delta B_1 = 2\frac{A_2^2}{A_1^2}$. Оно определяется удвоенным отношением мощности дополнительного тона к мощности основного.

Сказанное выше в принципе подтверждается результатами эксперимента, приводимыми на рис. 4.2, где изображена амплитудная характеристика основного тона частотой 800 Гц при отсутствии (пунктирная линия) и наличии (сплошная линия) дополнительного тона частотой 2000 Гц, имеющего на входе постоянную величину 0,5 Н/м². Из рисунка следует, что наличие дополнительного тона повышает отдачу на частоте основного тона. Это повышение тем больше, чем больше разница в величинах входных воздействий. При малых величинах основного тона повышение отдачи больше. В результате происходит спрямление амплитудной характеристики основного тона.

Посмотрим далее, как влияет наличие дополнительного тона на динамический диапазон. Пусть на вход нелинейного звена действуют разновременно, например, одно за другим, два гармонических колебания $A_1 \sin\omega_1 t$ и $A_2 \sin\omega_2 t$ или одна и та же частота, но с разными амплитудами $A_1 \sin\omega_1 t$ и $A_2 \sin\omega_1 t$. При этом в каждом случае одновременно действует дополнительное гармоническое колебание $A_3 \sin\omega_3 t$.

Из ур-ния (4.7) следует, что при малой величине $a_1 A_1$ амплитуда на выходе для частоты ω_1 будет

$$B_1 \cong \frac{3}{4} a_3 A_1^3 + \frac{3}{2} a_3 A_1 A_3^2,$$

а для частоты ω_2 или для ω_1, но при амплитуде A_2, отличной от A_1,

$$B_2 \cong \frac{3}{4} a_3 A_2^3 + \frac{3}{2} a_3 A_2 A_3^2.$$

Их отношение составит

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{A_1}{A_2} \frac{1 + A_1^2/2\,A_3^2}{1 + A_2^2/2\,A_3^2}. \quad (4.10)$$

Когда мощность дополнительного тона A_3 велика по сравнению с мощностью каждой из основных составляющих (практически достаточна разница в 3—4 раза), динамическая характеристика превращается для них в линейную: $B_1/B_2=A_1/A_2$. Если же $2A^2_3\ll \ll A^2_1$ и $2A^2_3\ll A^2_2$, то ур-ние (4.10) приводится к ур-нию (4.6) для случая отсутствия дополнительного тона. Это с очевидностью следует из такого варианта выражения (4.10):

$$\frac{B_1}{B_2}=\frac{A_1\left(A_1^2+2A_3^2\right)}{A_2\left(A_2^2+2A_3^2\right)}\cong\frac{A_1^3}{A_2^3}.$$

Пусть далее нелинейность устройства является частотнозависимой, что имеет место, например, в угольном микрофоне. Посмотрим, что происходит, когда для каждого из действующих на нели-

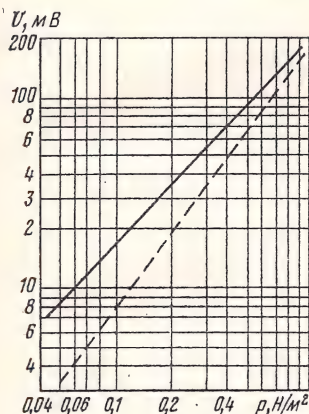


Рис. 4.2. Влияние дополнительного тона постоянной величины на ход амплитудной характеристики

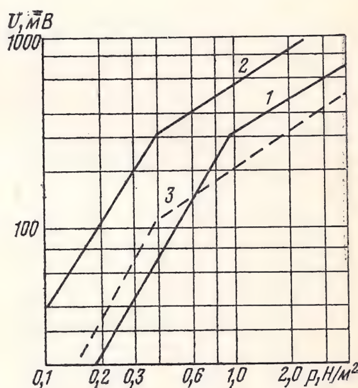


Рис. 4.3. Влияние амплитудной характеристики сильного тона (*1*) на ход характеристики слабого тона (*2, 3*)

нейное звено синусоидальных тонов динамическая характеристика выражается разными степенными уравнениями и как в таком случае взаимодействуют два тона. Проходят они независимо друг от друга каждый с присущими данной частоте искажениями или влияют как-то друг на друга? Ответ на этот вопрос можно получить из рис. 4.3, где приведены амплитудные характеристики угольного микрофона МК-10 с утрясенным порошком, когда нелинейность проявляется особенно сильно. Амплитудные характеристики были сняты на частотах 800 и 1400 Гц сначала раздельно (кривые *1*, *2*), а затем на частоте 800 Гц в присутствии сигнала 1400 Гц (кривая *3*). При этом амплитуды сигналов на входе перед каждым отсчетом уравнивались.

Анализ кривых, приведенных рис. 4.3, позволяет сделать следующие выводы:

1. Более сильный сигнал (в данном случае сигнал, при котором чувствительность больше) существенным образом влияет на ход амплитудной характеристики более слабого сигнала. Если крутизна амплитудной характеристики сильного сигнала $n_2>1$, то в его присутствии в пределах звуковых давлений, где это имеет место, отдача нелинейного звена для более слабого сигнала возрастает, а при $n_2<1$, наоборот, уменьшается.

В более общем виде взаимодействие сильного и слабого сигналов выражается в следующем. Если крутизна характеристики для более сильного тона f_2 больше, чем для f_1, то в соответствии с изложенным в разд. 4.3, следует ожидать, что крутизна амплитудной характеристики для f_1 в присутствии тона f_2 увеличится (приближенная пунктирная кривая на рис. 4.4*б*), так как амплитуда сигнала f_1 в присутствии тона f_2 возрастает тем больше, чем больше разница между величинами сигналов. На основании тех же соображений при $n_2<n_1$ крутизна результирующей характеристики для f_1 уменьшится (рис. 4.4*а*). Это согласуется с результатами эксперимента (см. рис. 4.3).

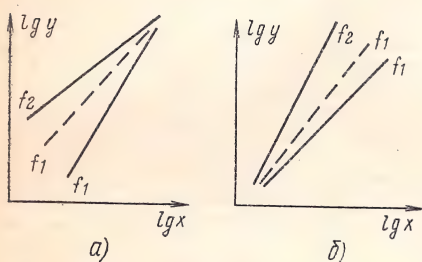


Рис. 4.4. Характер изменения амплитудных характеристик слабого тона под влиянием нелинейности характеристик сильного тона

2. Точка перегиба амплитудной характеристики слабого тона смещается в сторону меньших входных воздействий и приближается к уровням, соответствующим порогу ограничения на амплитудной характеристике сильного тона.

Таким образом, при нижнем ограничении амплитудная характеристика слабого сигнала под воздействием сопутствующего сильного сигнала приближается по форме (крутизне и уровню порога ограничения по входу) к амплитудной характеристике сильного сигнала. Нелинейность устройства в области максимума выходного спектра вызовет нелинейность того же характера и в остальной части спектра. Поскольку угольные микрофоны всех типов имеют наибольшие нелинейные искажения в области нижних частот разговорного диапазона (см. приложение 2), нецелесообразно и даже вредно повышать их отдачу на нижних частотах, так как влияние этих частот на разборчивость речи не существенно, а при повышенной чувствительности в данной области искажения распространяется на весь частотный диапазон. Наоборот, при подъеме частотной характеристики чувствительности микрофона в сторону верхних частот, где нелинейность значительно меньше, чем на низкой частоте, нелинейные искажения при прохождении сложных сигналов, например, отдельных звуков речи, снижаются во всем частотном диапазоне.

Если на входе нелинейного звена с характеристикой, выраженной степенным полиномом (4.7) (или, что для основного тона то же самое, показательной функцией третьей степени), действует шум и временами появляется тон и, наоборот, действует тон и временами появляется шум, сигналы эти так же, как чистые тона, взаимно усиливают друг друга. При преобладании интенсивности тона над интенсивностью спектра при появлении спектра величина тона не изменяется [1], а при появлении тона все составляющие спектра увеличиваются в $U^2{}_0/\sum\limits_{k=1}^{i} U^2{}_k$ раз. В случае преобладания интенсивности спектра над интенсивностью тона амплитуда последнего увеличивается при появлении спектра приблизительно в $2\sum\limits^{i} U^2{}_k/U^2{}_0$ раз. При постоянном уровне спектра приращение амплитуды тона тем больше, чем меньше сигнал; происходит спрямление динамической (амплитудной) характеристики для тона.

4.6. ПРОДУКТЫ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ ДВУХ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Сопоставляя ур-ние (4.7) для спектра на выходе в случае действия на входе двух гармонических колебаний с ур-нием (4.2) для одного колебания, можно установить, что в результате действия второго тона:

амплитуды второй и третьей гармоник первого тона не меняются;

появляются вторая и третья гармоники второго тона;

появляются суммарные и разностные частоты $(\omega_1 \pm \omega_2)$, являющиеся продуктами квадратичного члена исходного уравнения для динамической (амплитудной) характеристики [см. ур-ние (4.1)]. Величины амплитуд этих составляющих равны $a_2A_1A_2$;

появляются суммарные и разностные тона третьего порядка $(2\omega_1 \pm \omega_2)$ и $(\omega_1 \pm 2\omega_2)$ с амплитудами $\frac{3}{4}A_1A^2{}_2$ и $\frac{3}{4}A^2{}_1A_2$, являющиеся продуктами кубического члена ур-ния (4.1).

Обычно удельный вес гармоник и комбинационных частот оценивается коэффициентом нелинейных искажений. Оценка производится или по суммарным коэффициентам нелинейных искажений, или для каждой частотной составляющей выходного сигнала отдельно. Коэффициент нелинейных искажений K_f может определяться по отношению к суммарному выходному эффекту или только по отношению к основной составляющей сигнала или сигналов (при многочастотном воздействии). Для нас интерес представляют процессы, связанные с основной частотой (частотами). При этом в рассматриваемом здесь случае, т. е. при подаче на вход двух синусоидальных колебаний, могут иметь место два варианта:

1) одна из подводимых к входу частот является рабочим сигналом, а вторая помехой или вспомогательным сигналом;

2) обе частоты являются рабочими.

Для случая действия двух рабочих частот коэффициент нелинейных искажений от четных составляющих ($2\omega_1$, $2\omega_2$, $\omega_1+\omega_2$, $\omega_1-\omega_2$) будет на основании ур-ния (4.7)

$$K_2=\sqrt{\frac{\left(\frac{a_2}{2}A_1^2\right)^2+\left(\frac{a_2}{2}A_2^2\right)^2+(a_2A_1A_2)^2+(a_2A_1A_2)^2}{\left(\frac{3}{4}a_3A_1^3+\frac{3}{2}a_3A_1A_2^2\right)^2+\left(\frac{3}{4}a_3A_2^3+\frac{3}{2}a_3A_2A_1^2\right)^2}}. \qquad (4.11)$$

Если второй тон является помехой, то второе слагаемое в знаменателе следует приравнять нулю.

Коэффициент нелинейных искажений для составляющих третьего порядка ($3\omega_1$, $3\omega_2$, $2\omega_1+\omega_2$, $2\omega_1-\omega_2$, $\omega_1+2\omega_2$, $\omega_1-2\omega_2$) выражается соотношением

$$K_3=\sqrt{\frac{\left(\frac{a_3}{4}A_1^3\right)^2+\left(\frac{a_3}{4}A_2^3\right)^2+2\left(\frac{3}{4}a_3A_1^2A_2\right)^2+2\left(\frac{3}{4}a_3A_2^2A_1\right)^2}{\left(\frac{3}{4}a_3A_1^3+\frac{3}{2}a_3A_1A_2^2\right)^2+\left(\frac{3}{4}a_3A_2^3+\frac{3}{2}a_3A_2A_1^2\right)^2}}. \qquad (4.12)$$

В табл. 4.1 приведены величины коэффициентов нелинейных искажений для отдельных составляющих спектра на выходе в случае, когда частота ω_1 является рабочей частотой, а ω_2 — помехой или вспомогательной частотой.

Таблица 4.1

Гармоники и комбинационные частоты	Коэффициенты нелинейных искажений		
	$A_1^2 \gg A_2^2$	$A_1=A_2=A$	$2A_2^2 \gg A_1^2$
$2\omega_1$	$2a_2/3a_3A_1$	$2a_2/9a_3A$	0
$2\omega_2$	0	$2a_2/9a_3A$	$2a_2/3a_3A_2$
$\omega_1+\omega_2$	0	$4a_2/9a_3A$	0
$\omega_1-\omega_2$	0	$4a_2/9a_3A$	0
$3\omega_1$	1/3	1/9	0
$3\omega_2$	0	1/9	1/3
$2\omega_1+\omega_2$	0	1/3	0
$2\omega_1-\omega_2$	0	1/3	0
$\omega_1+2\omega_2$	0	1/3	0
$\omega_1-2\omega_2$	0	1/3	0

Данные таблицы соответствуют динамической характеристике, выраженной ур-нием (4.1) с ограниченным числом слагаемых до a_4x^4 и при $a_1x=0$. В случае, когда обе частоты являются рабочими, коэффициенты нелинейных искажений будут меньше в $\sqrt{2}$ раза. Из анализа табл. 4.1 следует, что:

1) когда мощность одного из двух подаваемых на вход нелинейного звена сигналов много больше мощности другого, все ком-

бинационные составляющие равны нулю. Они наиболее ярко выражены, если амплитуды входных сигналов близки друг к другу;

2) коэффициент нелинейных искажений для нечетных гармоник и комбинационных частот является величиной постоянной для каждой из них и не зависит от амплитуды входного воздействия, а при $a_1x=0$ и от формы динамической характеристики, т. е. коэффициентов степенного полинома. Продукты нелинейности нечетного порядка определяются только слагаемым третьей степени этого полинома. При $A_1=A_2=A$ они пропорциональны A^3, так же как и основная составляющая. Их отношение к основной составляющей является постоянной величиной. Поэтому динамическая характеристика типа $y=ax^3$, как и при одиночном сигнале, подобна амплитудной характеристике;

3) независимость коэффициента нелинейных искажений составляющих третьего порядка от величины входного сигнала сохраняется при любых соотношениях между амплитудами составляющих этого сигнала. Коэффициент нелинейных искажений от гармоники $3\omega_1$ максимален при отсутствии второй частоты и равен 1/3; при $A_1=A_2$ он уменьшается до 1/9, т. е. в 3 раза, а при $2A^2_2\gg A^2_1$ он равен нулю. Комбинационные частоты отсутствуют, когда удвоенная мощность одного из тонов на входе много больше мощности другого. Они максимальны при $A_1=A_2$. При этом удельный вес каждой из комбинационных составляющих третьего порядка в выходном сигнале в 3 раза больше, чем гармоник $3\omega_1$ или $3\omega_2$, и составляет 1/3 по отношению к основной частоте (при $A_1=A_2$);

4) суммарная доля комбинационных частот $2\omega_1\pm\omega_2$ и $\omega_1\pm2\omega_2$ в выходном сигнале составляет максимум (при равенстве амплитуд составляющих) 66,7%, если один тон рабочий, а второй — помеха, и 48%, когда оба тона рабочие. Аналогично для гармоник $3\omega_1$ и $3\omega_2$ будет соответственно 15,7 и 11%, а общая доля гармоник и комбинационных частот—69 и 49%;

5) при $A_1=A_2$ величина комбинационных частот $\omega_1+\omega_2$ и $\omega_1-\omega_2$ в 2 раза больше, чем гармоник $2\omega_1$ и $2\omega_2$. Последние также максимальны в отсутствие дополнительной частоты и равны нулю, когда амплитуда ее велика. При равенстве амплитуд сигналов на входе коэффициент нелинейных искажений от каждой из гармоник $2\omega_1$ и $2\omega_2$ уменьшается в 3 раза по сравнению с отсутствием дополнительного тона.

Как следует из той же таблицы, коэффициенты нелинейных искажений от четных гармоник и четных комбинационных тонов зависят от отношения a_2/a_3 исходного степенного полинома и от амплитуды входного воздействия. Это значит, что в случае воздействия двух частот, так же как и для одиночного тона, динамическая характеристика отличается от амплитудной. Обратная пропорциональность коэффициента нелинейных искажений для четных составляющих величине амплитуды входного сигнала обусловлена тем, что амплитуды квадратичных продуктов нелинейности пропорциональны квадрату амплитуды входного воздействия, а амплитуда основной частоты — кубу этой амплитуды.

4.7. ПРОДУКТЫ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ СИГНАЛЕ

Динамическая характеристика нелинейного звена часто не может быть ограничена кубическим членом ур-ния (4.1). Если на входе такой системы действует многочастотный сигнал

$$x = \sum_{k-1}^{m} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k), \qquad (4.13)$$

то определение амплитуд и фаз (а фазы иногда нужны) всех гармоник и комбинационных частот нелинейного звена связано с необходимостью возводить выражение (4.13) последовательно в степень от 1 до n, т. е. с определением величин

$$a_n x^n = a_n \left[\sum_{k-1}^{m} A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \right]^n .$$

Решить эту задачу непосредственно очень трудно. Даже в сравнительно простом случае при рассмотрении воздействия трех синусоидальных колебаний на нелинейную систему с динамической характеристикой, ограниченной четырьмя первыми слагаемыми ур-ния (4.1), выражение получается очень громоздким. Количество составляющих в сложном сигнале может быть очень велико и динамическая характеристика может аппроксимироваться большим числом членов.

Для решения таких задач В. А. Котельниковым был предложен метод [2, 4], позволяющий значительно упростить все расчеты и определить частоту, амплитуду, фазу и общее число колебаний, создаваемых нелинейностью любой степени. Решение дается в виде суммы косинусов с частотами для каждого из них

$$\omega_1 = (k_1 - k_1') + \omega_2 (k_2 - k_2') + \ldots \omega_m (k_m - k_m')$$

и фазами

$$\varphi_1 (k_1 - k_1') + \varphi_2 (k_2 - k_2') + \ldots \varphi_m (k_m - k_m').$$

Амплитуды составляющих определяются выражением

$$\frac{a_n}{2^{(n-1)}} \frac{n!}{k_1!\, k_1'!\, k_2!\, k_2'! \ldots k_m!\, k_m'!} A_1^{k_1+k_1'} A_2^{k_2+k_2'} \ldots A_m^{k_m+k_m'} . \qquad (4.14)$$

Во всех этих выражениях k_1, k'_1, k_2, k'_2 и т. д. есть любые положительные числа или нули, равные в сумме величине n: $k_1+k'_1+k_2+k'_2+ \ldots +k_m+k'_m=n$. При этом необходимо, чтобы хотя бы одна разность k_1-k', $k_2-k'_2$, ..., $k_m-k'_m$ была больше нуля.

Рассмотрим далее случай, когда характеристика нелинейного звена выражается степенной функцией $y=ax^n$. Аналогичное уравнение приходится решать, когда динамическая характеристика выражается степенным полиномом (4.1) и ищется выходной эффект от любого слагаемого этого полинома.

Пусть входной сигнал представляет собой узкий спектр, состоящий из нескольких дискретных компонент с одинаковыми амплитудами и фазами

$$x = \frac{A}{l} \sum_{i=1}^{l} \cos\left[\omega_0 + \frac{\Delta\omega_0}{2} + (i-1)\Delta\omega\right] t,$$

где ω_0 — средняя угловая частота спектра; $\Delta\omega_0$ — ширина спектра; $\Delta\omega$ — интервал между соседними составляющими.

Решение для этого случая [1] дает систему дискретных спектров, раздельно расположенных по частотному диапазону; число их равно числу гармоник от чистого тона при искажении его в той же нелинейной системе. Местоположение средних частот этих спектров совпадает с местоположением гармоник от чистого тона, имеющего частоту, равную средней частоте неискаженного спектра. Ширина каждого гармонического спектра $n\Delta\omega_0$, т. е. спектры располагаются около частот $p\omega_0$ в пределах $\pm\frac{n\Delta\omega_0}{2}$, где $p=(n-2l)$ — порядковый номер спектра.

Для сплошного спектра той же ширины и интенсивности при плотности спектра F_1

$$x=\frac{F_1}{\pi}\int\limits_{\omega_0-\frac{\Delta\omega_0}{2}}^{\omega_0+\frac{\Delta\omega_0}{2}}\cos\omega t\,d\omega=\frac{2F_1}{\pi t}\sin\Delta\omega\cos\omega_0 t.$$

Если выполняется условие $\omega_0>n\Delta\omega_0$, спектральная плотность гармонического спектра p-го порядка на выходе будет

$$y_p=\frac{B_1\binom{n}{\frac{n-p}{2}}}{2^{n-2}\Delta\omega_0^n\,(n-1)!}\sum_{q=0}^{r_1}(-1)^q\left(\omega-p\,\omega_0+\frac{n-2q}{2}\Delta\omega_0\right)^{n-1}\binom{n}{q},$$

а суммарный эффект

$$y=\frac{1}{\pi}\sum_{p=0}^{E\left(\frac{n}{2}\right)}\int\limits_{p\,\omega_0-\frac{n\,\Delta\omega_0}{2}}^{p\,\omega_0+\frac{n\,\Delta\omega_0}{2}}y_p\cos\omega\,d\omega=\frac{1}{\pi t}\,\frac{B\binom{n}{\frac{n-p}{2}}}{2^{n-2}\,\Delta\omega_0^n\,(n-1)!},$$

где $r_1=E\left(\frac{\omega-p\omega_0}{\Delta\omega_0}+\frac{n}{2}\right)$; $B_1=aF^n{}_1$; $E\left(\frac{n}{2}\right)$ —целые части от величины $n/2$.

Анализ этих выражений позволяет установить, что для единичного сплошного спектра, т. е. спектра единичного импульса, соответствующего, например, взрывным согласным звукам, в полной мере справедливы заключения, сделанные для узкого дискретного спектра. При большом числе тонов, равномерно расположенных по частотному диапазону, в небольших его пределах относительная величина мощности комбинационных составляющих достигает наибольшего значения при сплошном спектре. Ее величина, например, при искажениях третьей степени составляет для комбинационных частот $2\omega_k\pm\omega_l$ и $\omega_k\pm2\omega_l$ (в сумме) 2/9 мощности основных составляющих. Эта доля растет с увеличением показателя

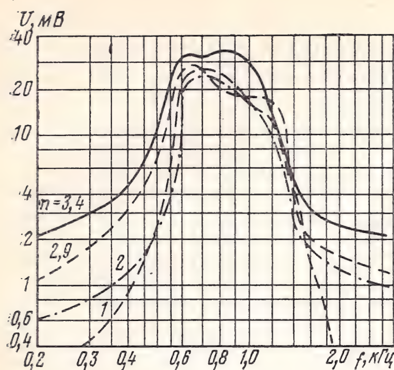


Рис. 4.5. Расширение спектра октавы под влиянием нелинейности

степени n. Так, при показателе степени $n=5$ она возрастает до 0,41.

Таким образом, с увеличением показателя степени растет относительная величина мощности составляющих, находящихся за границами диапазона. Это явление иллюстрируется кривыми рис. 4.5, где дана полученная экспериментально зависимость частотной характеристики, выходного сигнала от крутизны амплитудной характеристики n при подаче на вход спектра шириною около октавы. Величина n на рисунке дана в качестве параметра.

4.8. ИЗМЕНЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

Если на вход нелинейного звена с динамической характеристикой типа ax^3 подается регулярная составляющая U_1 и шум, имеющий нормальное распределение, то на выходе величина регулярной составляющей

$$U_2 = \frac{a}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int\limits_{-\infty}^{\infty} (U_ш + U_1)^3 \, e^{\frac{U_ш^2}{2\sigma_1^2}} \, d U_ш = a\left(U_1^3 + 3\,\sigma_1^2 U_1\right),$$

где $\sigma^2{}_1 = U^2{}_ш$ — дисперсия шумов до искажений.

Если регулярная составляющая, например компонента речи, значительно превосходит по интенсивности шум, то величина ее на выходе будет $aU^3{}_1$, т. е. она пройдет через НЗ независимо от шума. В случае, когда $\sigma_1 > U_1$, отношение сигнал/шум $U_2/\sigma_2 = \sqrt{\frac{3}{5}} \times U_1/\sigma_1 = 0{,}775\, U_1/\sigma_1$. Следовательно, отношение сигнал/шум на выходе практически не изменяется по сравнению с входным.

Список литературы

1. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
2. **Котельников В. А.** О воздействии на нелинейное сопротивление суммы синусоидальных колебаний. — «Научно-технический сборник ЛЭИС», 1936, № 14.
3. **Добровольский А. П.** О величине допустимых нелинейных искажений. — «Научно-технический сборник МЭИС», 1937, № 1.
4. **Резвяков А. П.** Влияние нелинейности на качество дальней телефонной связи. М., «Связь», 1969.
5. **Репина О. И.** Пути улучшения характеристик телефонного аппарата. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1959.

5

ХАРАКТЕР ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНОЕ УСТРОЙСТВО, ОГРАНИЧИВАЮЩЕЕ БОЛЬШИЕ АМПЛИТУДЫ

5.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Влияние ограничителя больших амплитуд (ограничителя по максимуму) на входной сигнал, так же как и при ограничении малых амплитуд, выражается в изменении величины основной (основных) составляющей, появлении продуктов нелинейности, изменении спектра исходного сигнала.

Аналитическое описание этих явлений сложно и эта сложность не компенсируется эффектом, который получается от более точного учета всего комплекса явлений, связанных с верхним ограничением. Поэтому рассмотрим только наиболее элементарные

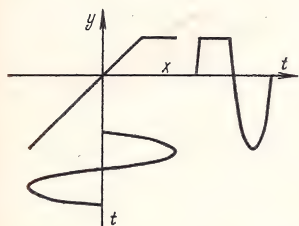


Рис. 5.1. Асимметричное одностороннее ограничение по максимуму

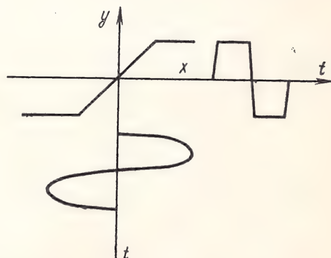


Рис. 5.2. Симметричное ограничение по максимуму

случаи, а в остальном ограничимся данными, позволяющими уяснить характер процессов на основе анализа этих явлений.

Ограничение по максимуму бывает асимметричным, когда ограничивается одна полуволна входного периодического сигнала (рис. 5.1) и симметричным при ограничении обеих полуволн (рис. 5.2). В соответствии с материалами, изложенными в гл. 1, при асимметричном ограничении появляются только четные гармоники, а при симметричном — только нечетные. Это значит, что для спектрального анализа при асимметричном ограничении пригодна только динамическая характеристика. При симметричном ограничении амплитудная характеристика по форме совпадает с динамической и может быть использована для получения информации о спектральном составе выходного сигнала.

5.2. ОГРАНИЧЕНИЕ ОДНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОНА

Для угольного микрофона и выходного каскада усилителя на транзисторах с ограниченным питанием (по току или напряжению) характерно ограничение (плавное) одной полуволны периодического сигнала, подводимого к входу. При значительном ограничении, а также в случае введения специальных ограничителей в схему, например в цепи управления громкоговорящих телефонных аппаратов, и в двухтактных усилителях, имеет место ограничение обеих полуволн, т. е. амплитудное ограничение симметричного типа.

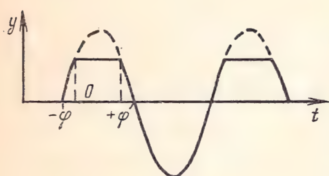


Рис. 5.3. Усеченная синусоида

Для упрощения рассмотрим случай резкого ограничения, в частности воздействие одиночного тона $x=A\cos\omega t$ на устройство с асимметричной динамической характеристикой, в котором ограничение наступает в пределах от $\omega t=-\varphi$ до $\omega t=+\varphi$ (рис. 5.3). Разложение этой периодической кривой в ряд Фурье [2] дает:

а) постоянную составляющую, равную $\frac{A}{\pi}(\varphi\cos\varphi-\sin\varphi)$;

б) колебание основной частоты, ослабленное в сравнении с входным $A\left(1-\frac{\pi-\varphi+\sin\varphi\cos\varphi}{\pi}\right)$;

в) гармоники с амплитудами

$$\sum_{m=2,4,6}^{\infty}\frac{A}{\pi}\left[\frac{\sin(m+1)\varphi}{m(m+1)}-\frac{\sin(m-1)\varphi}{m(m-1)}\right]\cos m\omega t.$$

Поскольку величина φ зависит от амплитуды входного сигнала A, амплитуда его на выходе и амплитуды гармоник также зависят от A. Это значит, что динамическая характеристика асимметричного ограничителя больших амплитуд имеет переменную крутизну и отличается от амплитудной характеристики.

При предельном ограничении одной полуволны, когда $\varphi=\pi/2$, что соответствует однополупериодному выпрямлению, ряд Фурье примет вид

$$y=\frac{A}{\pi}+\frac{A}{2}\cos\omega t-\frac{2A}{3\pi}\cos 2\omega t+\frac{2A}{15\pi}\cos 4\omega t+$$
$$+\frac{2A}{35\pi}\cos 6\omega t+\ldots$$

В этом случае постоянная составляющая равна A/π, амплитуда основного тона уменьшается в 2 раза и равна $\frac{A}{2}\cos\omega t$, амплитуды гармоник выражаются величинами $\frac{2A}{\pi}\frac{(-1)^{m/2}}{(m+1)(m-1)}$; коэффициенты гармоник равны при этом по отношению к амплитуде

основной составляющей: для частоты 2ω — 42,5%, для 4ω — 8,5%, для 6ω — 3,6%.

Пусть далее синусоидальный сигнал подается на вход симметричного ограничителя больших амплитуд (см. рис. 5.2). На выходе получим усеченную синусоиду; при этом $\cos\varphi = x_{пор}/A$. При $A > y$ для амплитуд, лежащих по входу выше порога ограничения, $y = \pm y_{пор}$. Амплитуда основной частоты на выходе будет [1] равна

$$C_1 = \frac{y_{пор}}{2\pi} \cdot \frac{\pi - 2\varphi + \sin 2\varphi}{\cos\varphi},$$

а амплитуда гармоник

$$C_m = \frac{y_{пор}}{\pi} \cdot \frac{m \sin\varphi \cos m\varphi - \sin m\varphi \cos\varphi}{m(m^2 - 1)\cos\varphi},$$

где $m = 3, 5, 7 \ldots$

При глубоком ограничении, т. е. при $\varphi \to \pi/2$

$$C_1 = 2\,y_{пор}/\pi = 2\,K x_{пор}/\pi; \quad C_m = 4\,y_{пор}/m\pi = 4\,K x_{пор}/m\pi,$$

где K — коэффициент передачи на линейном участке характеристики.

Максимальная величина коэффициента гармоник по отношению к суммарному значению сигнала на выходе составляет 48,6%. При ограничении, близком к предельному, как это следует из приведенных выше выражений, амплитуды составляющих выходного сигнала не зависят от амплитуды входного воздействия, а только от величины порога ограничения.

5.3. ОГРАНИЧЕНИЕ ДВУХ ТОНОВ ПРИ ИХ ОДНОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ

Если на симметричный ограничитель больших амплитуд подаются два синусоидальных тона $x_1 = A_1 \sin\omega t$ и $x_2 = A_2 \sin(\omega + \Delta\omega)t$, амплитуды которых связаны соотношением $A_2 = aA_1$, при этом $a < 1$, то при сильном ограничении, когда сигнал имеет прямоугольную форму, амплитуды колебаний на частотах ω_1 и ω_2 будут равны на выходе [1]

$$C_{\omega_1} = \frac{4\,y_{пор}\sqrt{1 - \frac{a^2}{2}}}{m\pi};$$

$$C_{\omega_2} = \frac{2a\,y_{пор}\,\omega}{\pi\,[m\omega + 2\Delta\omega]},$$

где $m = 1, 3, 5 \ldots$ Из этих выражений следует, что при сильном симметричном ограничении двух тонов:

амплитуды составляющих выходного сигнала пропорциональны величине порога ограничения $y_{пор}$ и зависят от отношения между амплитудами входных сигналов;

влияние слабого тона на сильный незначительно; при $a=0,3$ амплитуда сильного тона составит 0,97 по отношению к его амплитуде при отсутствии второго тона; при $a=1$ это отношение равно порядка 0,7;

отношение между амплитудами сильного и слабого тонов после прохождения через симметричный ограничитель увеличивается максимум в 2 раза по сравнению с их отношением на входе за счет большего уменьшения амплитуды слабого тона;

появляются гармонические составляющие от сильного тона;

появляется составляющая, симметричная по частоте слабому тону (зеркальная составляющая). Отношение суммарной мощности продуктов нелинейности к мощности основных тонов в 2,25 раза больше, чем при несимметричном ограничении.

Если сильный тон является вспомогательным (дополнительным), то действие его на амплитудную характеристику основного тона (слабого) в ограничителе больших амплитуд выражается в подавлении слабого тона, в то время как при ограничении малых амплитуд происходит, наоборот, усиление слабого тона в присутствии сильного (см. выше). Это явление иллюстрируется рис. 5.4, где приведены амплитудные характеристики тона частотой 800 Гц при отсутствии (кривая *1*) и наличии дополнительного тона частотой 2000 Гц (кривые *2, 3, 4*) после прохождения через ограничитель больших амплитуд [4]. Превышение сильного сигнала над слабым на входе ограничителя было при экспериментах для кривых *2, 3, 4* в порядке последовательности пяти-, десяти- и двадцатикратным.

Из рассмотрения кривых следует, что по мере увеличения амплитуды дополнительного тона и роста его ограничения растет ограничение и слабого тона. Это ограничение тем больше, чем больше на входе отношение $A_{доп}/A_{осн}$. Одновременно с подавлением слабого сигнала происходит сдвиг порога ограничения для слабого тона в сторону меньших входных воздействий. Это можно объяснить тем, что с ростом амплитуды сильного тона на входе при заданной величине порога ограничения увеличение амплитуды его на выходе наблюдается только в пределах, лежащих ниже порога ограничения, что означает сдвиг в сторону меньших величин по оси x порога сильного, а вместе с ним и слабого тона.

Подавление слабого тона сильным используется иногда для так называемой амплитудной селекции. В этом случае сильный тон на выходе может быть отделен фильтрами и интерес представляет изменение величины слабого тона, а не отношения между слабым и сильным тонами. Когда на симметричный ограничитель действуют два напряжения, амплитуда более слабого сигнала на выходе может быть определена выражением [3]

$$A_2 = 1,5\,\frac{y}{\pi}\,q + \frac{8}{3\pi}\sum_{\gamma=1}^{\infty}\frac{\sin\frac{3h\gamma}{2}}{\gamma^2}\,J_0\left(\frac{3\gamma}{2}\,p\right)J_1\left(\frac{3\gamma}{2}\,q\right),$$

где y — величина порога ограничения; $q=U_1/U_2<1$; J_1, J_0 — функции Бесселя.

На рис. 5.5 приведены графики, рассчитанные по этой формуле и характеризующие зависимость степени подавления слабого сигнала сильным от величины q при разных порогах ограничения y; p принято равным единице. Из графиков следует, что при поро-

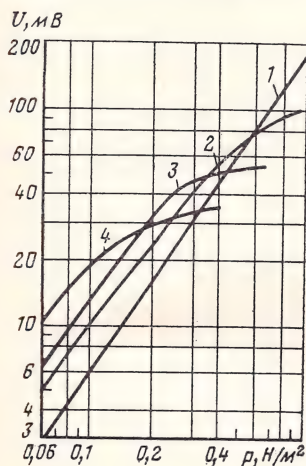


Рис. 5.4. Влияние сильного входного сигнала на амплитудную характеристику слабого при верхнем ограничении

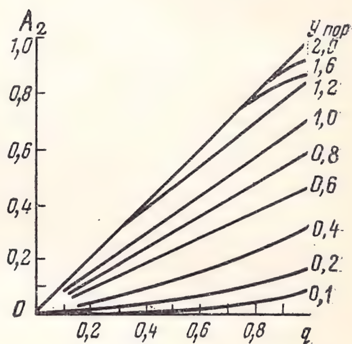


Рис. 5.5. Зависимость степени подавления слабого сигнала сильным от отношения между величинами сигналов q при разных порогах ограничения $y_{пор}$

ге ограничения $y=1$ и равенстве амплитуд входных сигналов выходной ток каждой исходной частоты имеет амплитуду, равную 0,704 от величины его при отсутствии ограничения, а при $q=0{,}2$ и том же пороге ограничения — до 0,2. Снижение порога ограничения сопровождается уменьшением слабой составляющей. Это снижение в значительных пределах изменения q и y пропорционально величине порога ограничения.

Если верхнее ограничение сочетать с селективным усилением сильного сигнала, то можно значительно увеличить q, а вместе с тем и эффективность подавления слабого сигнала, например, высокочастотных составляющих речи, которые могут служить причиной ложных срабатываний приемников тонального набора.

5.4. ОГРАНИЧЕНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

При сильном ограничении дискретного спектра и одной интенсивной составляющей отношение амплитуды этой составляющей к амплитуде любой из слабых составляющих увеличивается не более, чем в 2 раза; при этом около интенсивной составляющей и

ее гармоник появляются гармонические спектры и зеркальные составляющие.

В случае прохождения через симметричный ограничитель элементарного дискретного спектра интенсивности составляющих в середине полосы ослабляются, а на краях усиливаются. Спектр приобретает рогообразную форму. При увеличении числа составляющих, т. е. при переходе к элементарному сплошному спектру амплитуды всех составляющих на выходе, кроме крайних частот, стремятся (при сильном ограничении) к нулю. Спектр вырождается в два тона. Для флуктуационных шумов имеет место обратная картина некоторого усиления в центре полосы.

Появляющиеся при симметричном ограничении нечетные гармонические спектры, амплитуды которых обратно пропорциональны их порядковому номеру, имеют при предельном ограничении мощность не более 0,25 мощности спектра первого порядка; значительная часть этой мощности уходит за пределы частотного диапазона. Влияние их, особенно при небольшом ограничении, незначительно. Общая доля гармоник и комбинационных частот, так же как при ограничении двух тонов с одинаковыми амплитудами, не превышает 48,5%.

При ограничении речи в первую очередь ограничиваются мгновенные спектры наиболее мощных составляющих, т. е. главным образом гласных звуков. Анализ кривых на рис. 5.4 показывает, что одновременно с максимальными будут ограничиваться и слабые составляющие этих звуков, лежащие, например, в области верхних частот. При значительной неравномерности спектра звуков подавление слабых составляющих может доходить до 6 дБ. При глубоком ограничении аналогичная картина наблюдается и с согласными звуками. Следовательно, при верхнем ограничении происходит не выравнивание спектров отдельных звуков речи, как это имеет место при нижнем ограничении, а наоборот — увеличение неравномерности их спектрального состава.

Как показали экспериментальные исследования (см. гл. 7), при той же глубине ограничения в большей степени страдает разборчивость согласных звуков, хотя гласные начинают ограничиваться раньше. Это можно объяснить тем, что:

а) согласные имеют формантные области, которые для ряда из них можно рассматривать как элементарный сплошной спектр. Ограничитель преобразует их в рогообразную форму, т. е. с значительными искажениями. Гласные звуки, имеющие гармонические спектры, состоящие из основной частоты и формант, кратных по частоте основной составляющей, подвержены деформации в меньшей степени;

б) согласные звуки в большинстве своем имеют более высокочастотные спектры. Поэтому наиболее мешающие восприятию низкочастотные продукты нелинейности (комбинационные частоты) в меньшей степени, чем для гласных звуков, уходят за нижнюю границу воспроизводимого диапазона частот.

5.5. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА СИГНАЛЫ ПРИ ИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ДЕЙСТВИИ

При прохождении через ограничитель больших амплитуд каждый из сигналов претерпевает те изменения, которые были описаны выше. Вместе с тем происходит изменение соотношения между сигналами, поступающими на ограничитель разновременно. Выше было показано, что амплитуда сигнала под влиянием верхнего ограничения изменяется пропорционально порогу ограничения. При заданном пороге ограничения это означает для звуков с уровнями выше порога ограничения выравнивание интенсивности. Уровни сильных звуков в данном случае снижаются до уровня порога ограничения; интенсивности их будут равны и пропорциональны $y^2_{пор}$. При значительном ограничении выравнивание охватывает все звуки речи.

Ограничение сопровождается снижением громкости приема (что в ряде случаев можно компенсировать введением усиления), а при сильном ограничении искажениями передачи, поэтому величина допустимого ограничения имеет предел. При верхнем ограничении динамический диапазон речи сужается.

Рассмотренные явления обусловливают следующие выгоды от верхнего ограничения: 1) облегчается прохождение речи через устройства с узким динамическим диапазоном; 2) подавление сильных компонент сигнала до уровня слабых при одновременном усилении улучшает соотношение сигнал/помеха для слабых (согласных) звуков, обеспечивая повышение уровня этих звуков над шумами, поступающими в тракт после ограничителя (например, линейными помехами, акустическими шумами в месте приема); 3) снижение пиковых уровней передачи облегчает маскировку переходных разговоров помехами. Все эти явления будут более подробно рассмотрены ниже. Кроме того, при верхнем ограничении снижается зависимость громкости приема от колебаний уровня речи перед микрофоном.

5.6. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ РЕЧИ И ШУМА ПРИ ВЕРХНЕМ ОГРАНИЧЕНИИ

Если на вход ограничителя больших амплитуд поступают одновременно речь и гладкий непрерывный шум, то в случае, когда уровень речи выше уровня шума, происходит подавление слабого сигнала (шума) сильным (речью). Степень этого подавления не превышает в крайних условиях (когда отношение сигнал/помеха большое, а ограничение глубокое) 2 дБ. Следовательно, можно считать, что даже при значительном преобладании речи над шумом отношение между ними под влиянием верхнего ограничения практически не меняется.

Если на входе ограничителя интенсивность шума выше, чем речи, то происходит подавление речи шумом, что приводит к резкому снижению разборчивости речи. Если при этом уровень шума

все время изменяется, то одновременно изменяется и уровень речи; происходит модуляция речи шумом, что дополнительно снижает разборчивость речи.

В паузах речи подавления шума речью не происходит, кроме того, отсутствует также маскировка его речью, поэтому он в паузах слышнее, чем при наличии речевых сигналов.

5.7. СПЕКТР НА ВЫХОДЕ КОМПРЕССОРА ПРИ ОДИНОЧНОМ СИНУСОИДАЛЬНОМ СИГНАЛЕ НА ВХОДЕ

Характеристики составляющих спектра на выходе компрессора могут быть получены на основе разложения степенной функции в степенной полином (см. рис. 3.2 и приложение 1). Переход от степенного полинома к гармоническому ряду может быть осуществлен по тем же формулам, что и для $n=1\div3$ (см. гл. 4). Результаты расчета приведены на рис. 5.6. Амплитуда A_1 основной частоты, подводимой к входу нелинейного устройства, как это следует из кривых на рис. 5.6, тем больше на выходе, чем меньше показатель нелинейности (показатель компрессии) n. Гармоники также более ярко выражены при малых значениях n. Из них наибольшую амплитуду имеет гармоника частотой 2ω. Амплитуды гармоник выше четвертой оказались очень малы и на рисунке не могли быть изображены заметным образом.

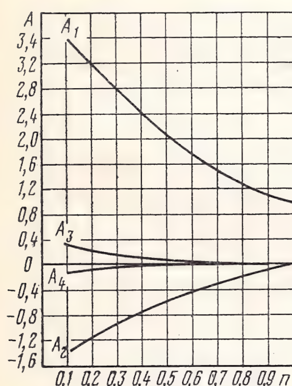


Рис. 5.6. Зависимость амплитуд гармонического ряда от показателя нелинейности $n<1$

Список литературы

1. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
2. **Гольдман С.** Гармонический анализ, модуляция и шумы. М., ИИЛ, 1959.
3. **Толубеев Б. Н.** Использование явлений нелинейной селекции для защиты приемников тонального вызова от ложных срабатываний. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС, 1967, вып. 7.
4. **Репина О. И.** Влияние амплитудной характеристики телефонного тракта на разборчивость речи и помехи. — «Электросвязь», 1971, № 11.

6

КРИТЕРИИ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

6.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для оценки нелинейных искажений принято в основном два критерия: 1) коэффициент нелинейных искажений, характеризующий процентное содержание продуктов нелинейности на выходе

нелинейного устройства; 2) амплитудная (динамическая) характеристика.

Длительное время суть нелинейных искажений сводили к появлению гармоник и единственным критерием нелинейности служил коэффициент гармоник. По мере проникновения в суть процессов, происходящих при нелинейных искажениях, арсенал критериев оценки постепенно расширялся. Развитие шло главным образом в сторону усложнения входного измерительного сигнала с целью наиболее полного выявления величин искажений и частотных областей их проявления. Рассмотрению основных способов оценки нелинейных искажений и целесообразности применения их для тех или иных целей и посвящена данная глава.

6.2. ОЦЕНКА ПО ПРОДУКТАМ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ОДНОЙ ЧАСТОТЕ

В качестве основного критерия нелинейности издавна применяется коэффициент нелинейных искажений от гармоник или сокращенно коэффициент гармоник, характеризующий процентное содержание гармоник в выходном сигнале при подаче на вход нелинейного звена синусоидального колебания:

$$K_f = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots}{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}} \cdot 100\%.$$

Здесь в числителе сумма эффективных значений напряжений гармоник, а в знаменателе — всех составляющих, включая основную частоту. Иногда коэффициент гармоник определяется не по отношению к суммарному эффективному значению выходного сигнала, а только по отношению к эффективному значению основного тона

$$K'_f = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots}{U_1^2}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2}}{U_1} \cdot 100\%.$$

Именно эта величина принята в качестве коэффициента нелинейных искажений в ГОСТ на угольные микрофоны [2].

Величины K_f и K'_f связаны соотношением

$$K_f = \frac{K'_f}{1 + (K'_f)^2 \cdot 10^{-4}} \quad K'_f = \frac{K_f}{\sqrt{1 - K_f^2 \cdot 10^{-4}}}.$$

При малых значениях гармоник $K_f \approx K'_f$.

Коэффициенты нелинейных искажений n-го порядка определяются уравнением

$$K'_{nf} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%, \quad K_{nf} = \frac{U_n}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots}} \cdot 100\%.$$

При малых величинах K_f они могут быть выражены через коэффициенты полинома (4.2)

$$K'_{2f} \approx K_{2f} \approx \frac{\frac{1}{2} a_2 U_1^2}{a_1 U_1 + \frac{3}{4} a_3 U_1^3} \approx \frac{a_2 U_1}{2a_1},$$

$$K'_{3f} \approx K_{3f} \approx \frac{\frac{1}{4} a_3 U_1^3}{a_1 U_1 + \frac{3}{4} a_3 U_1^3} \approx \frac{a_3 U_1^2}{4a_1}.$$

Часто нелинейность устройств оценивают затуханием коэффициента нелинейности

$$a_{k_f} = 20 \lg \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}}{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots}};$$

$$a'_{k'_f} = 20 \lg \frac{U_1}{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \ldots}} = 20 \lg \frac{1}{k'_f}.$$

Затухание коэффициента нелинейности отдельных гармоник

$$a'_{k'_f} = 20 \lg \frac{U_1}{U_f} = \beta_1 - \beta_f,$$

где β_1 — уровень основной частоты на выходе нелинейного звена; β_f — уровень соответствующей гармоники.

Общая величина коэффициента гармоник, измеренная при заданном входном воздействии, не связана как-либо однозначно с характером нелинейности, а потому не дает информации о причинах возникновения ее. Это можно установить, например, на основе рис. 6.1, где даны некоторые типы динамических характеристик

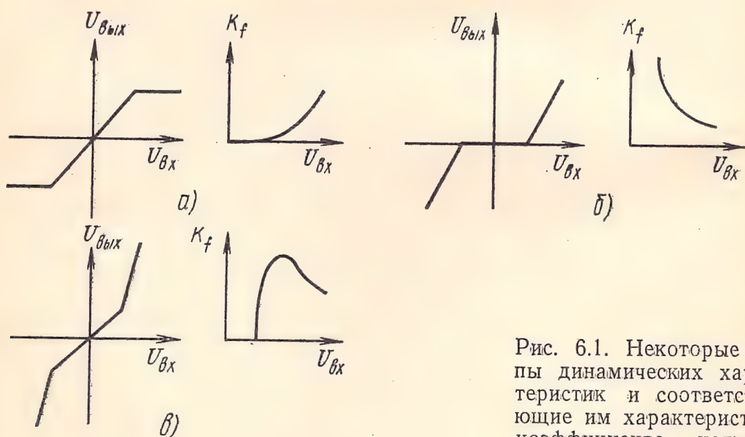


Рис. 6.1. Некоторые типы динамических характеристик и соответствующие им характеристики коэффициента нелинейных искажений

и соответствующие им характеристики зависимости коэффициента гармоник от амплитуды входного сигнала. При ограничении больших амплитуд (кривые на рис. 6.1*а*) коэффициент гармоник растет с ростом амплитуды, а при динамической характеристике типа центральной отсечки (кривые на рис. 6.1*б*), наоборот, уменьшается по мере роста входного сигнала. Последнее объясняется тем, что при заданном пороге отсечки форма выходного сигнала тем больше отличается от синусоиды, чем меньше амплитуда входного сигнала.

Следовательно, коэффициент гармоник является амплитудно-зависимой величиной. Поэтому недостаточно измерить его при одной заданной величине входного воздействия. Амплитудные характеристики коэффициента гармоник позволяют судить не только о величинах коэффициента гармоник в пределах заданного динамического диапазона, но в некоторой мере также и о форме динамической характеристики. Если к тому же измерены раздельно коэффициенты ряда гармоник, четных и нечетных, то в ряде случаев можно вычислить уравнение, аппроксимирующее динамическую характеристику (см. гл. 3).

Для измерения коэффициентов нелинейных искажений можно пользоваться анализаторами гармоник или измерителями нелинейных искажений. Например, измеритель нелинейных искажений типа ИНИ-11 позволяет определять величину K'_f непосредственно в процентах или децибелах.

Коэффициент гармоник незаменим для оценки нелинейных искажений устройств, предназначенных для работы на отдельных частотах, например, измерительных генераторов. Он часто применяется для оценки нелинейности деталей и узлов с небольшими искажениями. Для узлов с большими искажениями кроме коэффициента гармоник задается обычно также амплитудная характеристика.

В отечественных ГОСТ коэффициент гармоник предусмотрен как основная мера нелинейности при измерениях громкоговорителей [4] и телефонов [8]. В последнем случае он дополняется испытаниями на дребезжание при больших входных сигналах. Микрофоны, применяемые в широковещании, проверяются субъективно на качество звучания по сравнению с эталоном. Этот метод широко используется в мировой практике при исследованиях качества звучания различных электроакустических трактов и узлов. Иногда сравнение производится не с эталоном, а с естественным звучанием речи, музыки и т. д.

Нормы на допустимые коэффициенты гармоник для заданного типа аппаратуры устанавливаются на основе результатов испытаний с большим числом экспертов. Для каналов радиовещания в результате таких испытаний получены предельно допустимые величины коэффициентов гармоник дифференцированно для различных классов качества и различных диапазонов частот [3]. В этом случае рекомендуется проводить измерения при напряжениях на входе: номинальном 0,5 и 0,3 от номинального. Рекомендует-

ся также в пределах заданного для измерений диапазона выбирать такие частоты, чтобы хотя бы вторая гармоника лежала в пределах рабочей полосы частот.

Электромагнитные телефоны для телефонных аппаратов общего применения должны иметь коэффициент гармоник, измеренный на частоте 1000 Гц, не более 5% [34]. Для угольных микрофонов [33] эта величина не должна превышать 3% на частоте 300 Гц и 2% на 1000 Гц. Кроме того, задаются допустимые отклонения амплитудной характеристики от линейной. Затухание нелинейности будет при этом для телефонов 26 дБ, для микрофонов 30 — 34 дБ. Для высокочастотных каналов, особенно для групповой части, задаются значительно более жесткие нормы: $a_{k2} \geqslant 60—80$ дБ, $a_{k3} \geqslant 95—110$ дБ, что соответствует коэффициентам гармоник $K_{2f} = 0{,}1 \div 0{,}012$; $K_{3f} = 0{,}0016 \div \div 0{,}00022$.

При всех измерениях коэффициента нелинейных искажений важную роль играет чистота синусоидального сигнала, подводимого к входу измеряемого объекта. Если этот сигнал электрический, вопрос решается просто путем отсева гармоник с помощью электрических фильтров. При измерении акустико-электрических преобразователей (микрофонов) дело обстоит сложнее, так как даже при подаче на вход измерительного громкоговорителя или «искусственного голоса» чисто синусоидального колебания излучаемый звук может быть искажен вследствие нелинейности источника звука. Можно почти полностью исключить любую гармонику звукового поля (без исключения основного тона) путем установки микрофона в гладкой трубе на расстоянии четверти длины волны (узел давления) от громкоговорителя для микрофонов давления и на расстоянии половины длины волны (узел скорости) для микрофонов градиента давления [10].

6.3. ОЦЕНКА ПО ПРОДУКТАМ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

В большинстве случаев измерение гармоник недостаточно для оценки вредного влияния продуктов нелинейности, так как при этом не учитываются комбинационные тона, оказывающие на качество звучания значительное влияние. Кроме того, измеренная величина коэффициента гармоник зависит от неравномерности частотной характеристики нелинейного устройства. Мы получаем искаженные (преувеличенные или заниженные) величины на данной измерительной частоте в зависимости от того, попадают гармоники в область пика или провала частотной характеристики. Если они выходят за пределы передаваемого измеряемым объектом диапазона частот, нелинейность в области выше измерительной частоты вообще определить нельзя. Поэтому, например, в ГОСТ на измерения телефонов [8] указано, что при определении коэффициента нелинейных искажений измерительная частота, подаваемая на вход телефона, не должна превышать 1500 Гц.

В целях расширения области частот, где нелинейные искажения могут быть оценены по продуктам нелинейности, применяется метод разностных тонов (колебаний). В соответствие с рекомендациями МККТ [9] в качестве фактора квадратичных искажений было установлено отношение эффективного значения разностного колебания $f_2—f_1$ к сумме эффективных величин обоих основных тонов на выходе (для случая несимметричных искажений). В качестве коэффициента кубических искажений (в случае симметричных искажений) принято отношение суммы эффективных значений обоих разностных тонов $2f_1—f_2$ и $2f_2—f_1$ к сумме эффективных значений обоих основных тонов на выходе.

Частоты сигналов выбираются близкими друг к другу с таким расчетом, чтобы разность их $f_2—f_1$ или $f_1—f_2$ попадала в область низких частот диапазона. В ряде случаев эта разность выбирается равной 60 Гц. В устройствах, где такая низкая частота не воспроизводится, например в электроакустических преобразователях, применяемых в телефонных аппаратах, эта разность может быть выбрана значительно большей. Изменяя входные частоты, но оставляя постоянной разность между ними, можно обследовать весь частотный диапазон. При этом требуется перестройка частоты фильтров, включенных на выходе, в соответствии с изменением частот f_1 и f_2. Путем некоторого усложнения схемы измерений можно избежать этой перестройки [1].

При измерениях по методу взаимной модуляции одно из синусоидальных колебаний выбирается низкочастотным (50—150 Гц), второе — в области верхних частот от 1000 Гц и выше (до 5000—10 000 Гц). При этом амплитуда низкочастотного колебания берется в 4 раза, т. е. на 12 дБ большей, чем высокочастотного. Если испытуемое устройство характеризуется нелинейностью, происходит взаимная модуляция сигналов. Из спектра выходного сигнала выделяются с помощью фильтра группа частот $f_1 \pm \bar{n} f_2$ и составляющая высокой частоты, т. е. спектр модулированного колебания. После детектирования получаются: постоянная составляющая, пропорциональная эффективному значению несущего колебания, и переменная составляющая, пропорциональная эффективному значению комбинационных продуктов нелинейности. Мерой нелинейности является отношение $U_{\sim}/U_{=}$.

6.4. ОЦЕНКА ПО ПРОДУКТАМ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ШУМОВЫХ ПОЛОСАХ

Измерения на двух частотах, а тем более на одной частоте не дают полной картины нелинейных искажений, так как речевой сигнал в каждый момент гораздо богаче составляющими; положение компонент этого сигнала в речевом диапазоне и соотношение между их амплитудами отличаются большим разнообразием. Даже при большом числе вариантов измерений на двух частотах невозможно воспроизвести все многообразие действительной картины при речи. Поэтому в настоящее время все большее развитие полу-

чают методы измерений, которые основаны на передаче через нелинейное звено многочастотных дискретных или сплошных спектров, и обеспечивают существенное приближение к рабочим условиям передачи. Методы эти используются в основном в тех областях, где к величинам нелинейных искажений предъявляются особо жесткие требования, например в каналах многоканальных систем, в наиболее ответственных узлах систем высокочастотного радиовещания, в каналах звукового сопровождения кино и телевидения.

Недостатки методов измерений нелинейных искажений на отдельных частотах рассмотрены в ряде работ [14, 17, 18]. В НИКФИ был разработан инфразвуковой метод измерения нелинейных

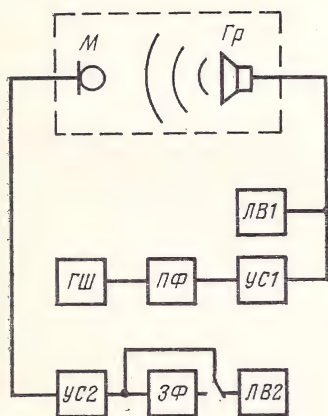


Рис. 6.2. Схема измерений нелинейных искажений с помощью частотных полос шума

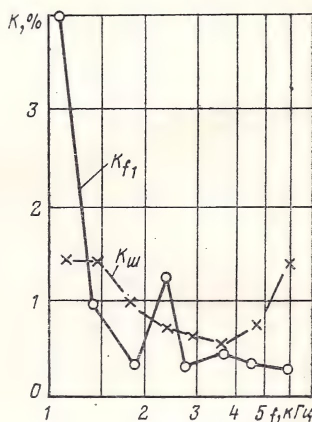


Рис. 6.3. Результаты измерения нелинейных искажений методами гармоник (K_{f_1}) и полос шума ($K_ш$)

искажений [14, 15], в котором влияние частотной неравномерности характеристик громкоговорителя сведено к минимуму. Однако этому методу присущ ряд недостатков [16], которые и помешали его внедрению.

Существует несколько способов измерения нелинейных искажений при подаче на вход четырехполюсника шумовых полос. Простейший из них осуществляется с помощью схемы, состоящей из генератора сплошного спектра, фильтра низкой частоты на входе и фильтра высокой частоты на выходе измеряемого объекта. Фильтр высокой частоты задерживает частоты, подаваемые на вход, и пропускает продукты нелинейности.

При другом методе из сплошного спектра, создаваемого генератором, вырезается полоса с помощью полосного фильтра и подается на вход измеряемого устройства. На выходе включается

фильтр низких частот. Мерой нелинейных искажений являются продукты с малыми разностными частотами.

Широкое распространение получил метод, в котором из входного спектра с помощью заграждающего фильтра вырезается полоса частот; при этом на выходе включен полосовой фильтр, настроенный на ту же полосу частот, что позволяет измерить продукты нелинейности, появившиеся в этой полосе.

В [17, 19] описан метод, предназначенный для устройств с резко неравномерной частотной характеристикой и частотнозависимой нелинейностью. Схема измерений приведена на рис. 6.2. При измерениях на вход измеряемого объекта от генератора шума (ГШ) подается полоса частот (октава, половина или треть октавы). Мерой нелинейности служит отношение действующего значения продуктов нелинейности к действующему значению основной составляющей или суммарного выходного сигнала. В первом случае к выходу измеряемого объекта подключается параллельно полосовой фильтр (ПФ), пропускающий только исходную полосу частот, и заградительный фильтр (ЗФ), не пропускающий ее. Отношение между показаниями прибора на выходе заградительного и полосного фильтров и есть коэффициент искажения. Во втором случае к выходу подключен только заградительный фильтр. Продукты нелинейности измеряются на его выходе, а суммарное значение сигнала на его входе. Для определения зависимости нелинейных искажений от частоты полосу шума передвигают по диапазону и в соответствии с этим перестраивают фильтры на выходе. При расположении полосы в области нижних частот на выход заградительного фильтра попадают гармоники и суммовые тона, при расположении близко к середине, кроме того, и разностные частоты, а при расположении в верхней части диапазона преимущественно разностные частоты. При этом измеряется суммарное значение как квадратичных, так и кубических искажений.

Чем шире полоса шума, применяемая при измерениях, тем в в большей степени сглаживается влияние пиков характеристики громкоговорителя на результаты измерений. С другой стороны, при узкой полосе продукты нелинейности отделяются лучше и, кроме того, представляется возможность выявить бо́льшие подробности зависимости нелинейных искажений от частоты.

На рис. 6.3 приведены результаты измерений частотной зависимости нелинейных искажений методом гармоник и методом полос шума. В первом случае кривая носит резко пикообразный характер и имеет тенденцию резкого спада в сторону верхних частот; во втором случае кривая более плавная и имеет седлообразную форму.

Аналитическая связь между коэффициентами нелинейных искажений, измеренных на шумовых полосах и синусоидальных тонах, установлена в [20, 21].

Любой из описанных выше методов измерений нелинейных искажений может быть автоматизирован как в части продвижения

полосы шума по частотному диапазону, так и в записи показаний измерительных приборов на выходе схемы.

Все большее применение находят корреляционные способы измерений нелинейных искажений, являющиеся особенно удобными в отношении устройств с изменяющейся динамической нелинейно-

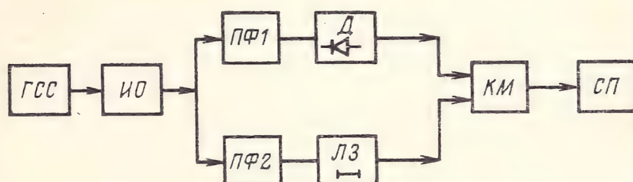


Рис. 6.4. Схема измерений нелинейных искажений корреляционным методом:

ГСС — генератор сплошного спектра; ПФ1, ПФ2 — полосовые фильтры на интервалы частот, значительно различающиеся по средней частоте; КМ — коррелометр; СП — самописец; ЛЗ — линия задержки; Д — выпрямитель

стью. Сущность одного из вариантов метода поясняется схемой, представленной на рис. 6.4.

Если нелинейные искажения отсутствуют, выделенные спектры взаимно не коррелированны и самописец (СП) показаний не дает. При наличии нелинейных искажений высокочастотные составляющие спектра модулируются низкочастотными составляющими и после детектирования подаются на СП, который и фиксирует функцию взаимной корреляции и соответственно нелинейные искажения (по максимальным значениям).

Используются и смешанные варианты с передачей синусоидальных сигналов и сигналов сплошного спектра.

6.5. ОЦЕНКА ПО ПРОДУКТАМ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ

Метод получил наименование динамического [22]. В нем отразилось стремление приблизить условия измерений нелинейных искажений к действительным условиям работы нелинейного устройства, характеризующимся непрерывной сменой частот, амплитуд и фаз составляющих входного сигнала, и таким образом преодолеть имеющиеся расхождения между результатами измерений и субъективным восприятием нелинейных искажений. Поскольку в восприятии нелинейных искажений решающую роль играет спектральное и амплитудное распределения продуктов нелинейности и составляющих полезного сигнала, при измерениях по указанному методу на вход измеряемого объекта подается в течение 20—30 с реальная программа (речь, музыка, пение). Индикаторы выполнены по схеме интеграторов, дающих усредненное значение за время интервала измерений.

Напряжение от источника подается на измеряемый объект через режекторный фильтр, вырезающий из программы заданную полосу частот. С выхода четырехполюсника напряжение подводится к индикатору через полосовой фильтр с той же полосой частот. В устройстве предусмотрен набор заградительных и полосовых фильтров, перекрывающих весь диапазон частот.

Для измерений основных составляющих полезного сигнала на выходе источника звука параллельно заградительному фильтру

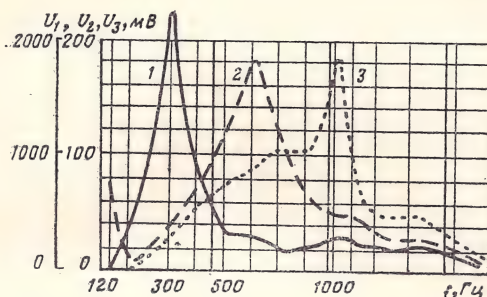


Рис. 6.5. Результаты измерения нелинейных искажений на действительной программе:

1 — исходный сигнал; *2*, *3* — квадратичные и кубические искажения

включен полосовой фильтр, аналогичный включенному на выходе измеряемого объекта, и далее индикатор-интегратор, дающий суммарное значение полезного сигнала в заданной полосе за время интеграции. Результаты измерений представлены на рис. 6.5.

В качестве меры нелинейности принято отношение величин продуктов нелинейности J' в заданной полосе частот к величине полезного сигнала J_0 в той же полосе частот:

$$S = k \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} J'(\omega)\, d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} J_0 \omega\, d\omega},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Описанная выше схема представляет один из возможных вариантов динамического метода и в зависимости от конкретных требований может видоизменяться.

Если соответствующим образом подобрать дикторский текст, чтобы по спектральному и амплитудному распределениям он был близок к среднестатистическому распределению составляющих речи, динамический метод может дать результаты измерений продуктов нелинейности значительно более близкие к их величине в условиях реальной передачи речи, чем другие, рассмотренные выше методы. Одним из недостатков его является значительная дли-

тельность измерений. Однако все другие методы измерений, в том числе и метод полос шума, требуют проведения серии измерений при разных уровнях входного сигнала, так как в подавляющем большинстве случаев коэффициенты нелинейных искажений являются величинами амплитуднозависимыми.

Одним из достоинств метода является то, что при интегрировании продуктов нелинейности автоматически учитывается их длительность. Измерения нелинейных искажений при больших уровнях сигналов, близких к пиковым значениям, как это иногда делается, дают ложную картину, так как пики малой длительности не всегда улавливаются слухом. Динамический метод дает усредненное по времени и амплитуде значение продуктов нелинейности.

6.6. ОЦЕНКА ПО ЛИНЕЙНОСТИ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для оценки линейности амплитудной характеристики используются три критерия: 1) постоянство коэффициента передачи; 2) величина отклонения от линейности; 3) величина показателя нелинейности.

Оценка по постоянству коэффициента передачи. В гл. 3 говорилось, что для линейной системы характерна пропорциональность между входным и выходным сигналами, т. е. постоянство коэффициента передачи k и его независимость от величины входного воздействия: $k=y/x=\text{const}$. В связи с этим для оценки системы в качестве меры нелинейности применяют иногда зависимость коэффициента передачи от эффективной величины входного сигнала. В случае наличия верхнего и нижнего ограничений эта кривая имеет вид, изображенный на рис. 6.6. Ее участок, параллельный оси x, позволяет определить область линейности, а отклонение ее от горизонтали, выражаемое обычно в децибелах, — степень нелинейности.

Оценка по величине отклонения от линейности. Отклонение задается непосредственно по амплитудной характеристике без пересчета ее на всем протяжении в характеристику коэффициента передачи. Так, например, в соответствии с [2] отклонение от линейности определяется на двух участках амплитудной характеристики отдачи между звуковыми давлениями 0,1 и 1 Н/м², а также между 1 и 3 Н/м²:

$$\alpha_1 = 20\lg\frac{U_{0,1}}{U_1}\cdot\frac{1}{0,1};$$

$$\alpha_2 = 20\lg\frac{U_3}{U_1}\cdot\frac{1}{3},$$

где U — отдача при звуковых давлениях, соответствующих индексам. Согласно [6] коэффициенты передачи телефонного аппарата при звуковых давлениях 0,1 и 3 Н/м² не должны отличаться от коэффициента передачи при 1 Н/м² более, чем на 6,0 дБ.

Оценка по показателю нелинейности. Степень отклонения амплитудной (динамической) характеристики от линейности можно

оценить по величине показателя нелинейности показателя степени в уравнении, выражающем амплитудную (динамическую) характеристику $y=ax^n$. Величина его дает информацию и о характере нелинейности; при $n>1$ имеет место ограничение малых амплитуд; при $n<1$ — ограничение больших амплитуд.

Показатель нелинейности определяется по амплитудной характеристике как ее крутизна:

$$n = \frac{20 \lg y - C}{20 \lg x},$$

где $C=20 \lg a$ — уровень отдачи при единице входного воздействия или чувствительность, выраженная в логарифмах. При $n=1$ система линейна и величина выходного сигнала пропорциональна

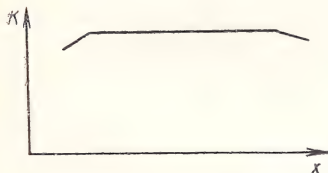


Рис. 6.6. Зависимость коэффициента передачи от величины входного сигнала

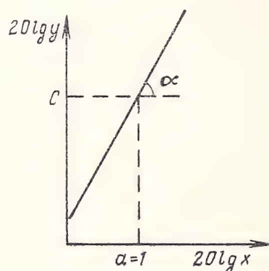


Рис. 6.7. Определение показателя нелинейности

величине входного: $y=ax$; $20 \lg y=C+20 \lg x$. Если при этом начало координат перенести в точку C (рис. 6.7), то в новой системе координат $\frac{20 \lg y}{20 \lg x}=1$, $\alpha=45°$.

Таким образом, пределы линейности системы характеризуются участком амплитудной характеристики, построенной в логарифмическом масштабе, на котором угол наклона амплитудной характеристики равен 45°.

Показатель нелинейности может быть связан аналитически (см. ниже) с величиной уровня ощущения, т. е. служить для расчетов разборчивости речи. В этом его главное преимущество перед другими способами оценки нелинейных искажений. По показателю нелинейности для динамической характеристики может также быть определен спектральный состав выходного сигнала.

6.7. НЕКОТОРЫЕ НЕДОСТАТКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Так же, как при измерении коэффициентов нелинейных искажений, при измерении амплитудных характеристик могут быть использованы различные типы входных сигналов: отдельные час-

тоты, полосы шума, реальная речевая программа или, как это предусмотрено в ряде ГОСТ, усредненный за длительное время речевой спектр. Чаще всего измерения производятся на речевом спектре или на отдельных частотах.

Исходя из анализа явлений, происходящих при нелинейных искажениях (см. гл. 4 и 5), входной измерительный сигнал должен удовлетворять следующим требованиям:

1) отражать частотный спектр речевого процесса;

2) воспроизводить влияние сильных компонент сигнала на амплитудные характеристики слабых частотных составляющих;

3) позволять выявить частотную зависимость нелинейных искажений;

4) обеспечить возможность выделения с помощью фильтров основных составляющих на выходе НЗ (соответствующих по частоте входному сигналу, несущему информацию) и отсев продуктов нелинейности (помех);

5) обеспечить возможность математической связи со статистическими характеристиками речи, лежащими в основе всех расчетов разборчивости речи.

Рассмотрим, в какой степени принятые при измерениях амплитудных характеристик сигналы (речевой спектр и чистые тона) соответствуют этим требованиям. Суммарный среднестатистический речевой спектр, который представляет собой усредненное за длительное время спектральное распределение речи, неполностью удовлетворяет первому из этих требований. Действительная речь в каждый данный момент времени значительно беднее частотными составляющими, чем этот обобщенный спектр. Это вызывает отклонение от действительной картины при передаче речи как в части взаимного влияния основных составляющих сигналов друг на друга, так и в части состава и амплитуд гармоник и комбинационных частот. Затруднено также отделение основных составляющих от продуктов нелинейности, которые при широком спектре входного измерительного сигнала совпадают с ним.

При измерении на чистых тонах допускается еще бо́льшая погрешность, но уже в сторону упрощения (обеднения) спектра. Метод позволяет отделить гармоники от основных частот, но не позволяет учесть влияние взаимодействия между составляющими на амплитудные характеристики на разных частотах. Некоторые расхождения в величинах разборчивости устройств, содержащих нелинейные элементы, при измерениях тональным и артикуляционным методами, можно, по-видимому, объяснить именно тем, что тональный метод, где определение уровня ощущения производится на синусоидальных сигналах, не позволяет учесть взаимное влияние составляющих отдельных звуков речи друг на друга. В какой-то мере здесь влияет также неучет помех от продуктов нелинейности, образующихся при прохождении речи через нелинейное устройство.

Метод измерения на чистых тонах можно было бы освободить от основного недостатка, если были бы известны для каждой час-

тотной полосы наиболее вероятные сопутствующие частоты и наиболее вероятные их уровни.

Переход от амплитудной характеристики, снятой на суммарном речевом спектре, к амплитудным характеристикам для отдельных частот производится обычно следующим образом. Принимается, что полученная амплитудная характеристика соответствует области максимальной чувствительности, т. е. пику частотной характеристики, измеренной при постоянной величине входного синусоидального сигнала. Амплитудные характеристики для отдельных частот получаются путем параллельного сдвига основной амплитудной характеристики [29].

Метод этот иллюстрируется рис. 6.8, где приведена амплитудная характеристика (кривая *1*) и частотная характеристика (кривая *2*), измеренная при звуковых давлениях на входе, равных на каждой частоте примерно среднему суммарному уровню речи (по ГОСТ 1 Н/м²). В точке, где уровни на выходе для обеих кривых одинаковы, кривые совмещают (точка *a*). Для определения амплитудной характеристики на частоте *f′* точка *a* амплитудной характеристики переносится в точку *a′* частотной характеристики и амплитудная характеристика достраивается вверх и вниз по аналогии с исходной кривой параллельно ей.

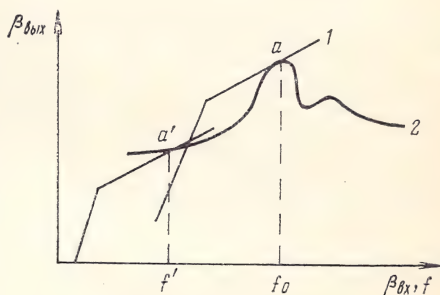


Рис. 6.8. Параллельный перенос амплитудных характеристик:
1 — $\beta_{вых}=\varphi(\beta_{вх})$; *2* — $\beta_{вых}=\varphi(f)$

Такой метод параллельного переноса был предложен для угольных микрофонов в [29], исходя из следующих основополагающих предположений:

а) механическое сопротивление угольного микрофона представляет собой жесткость, а потому глубина модуляции сопротивления, а значит, и развиваемое микрофоном напряжение одни и те же при одной и той же амплитуде сжатия независимо от частоты;

б) частотная характеристика, снятая при одном и том же звуковом давлении, в достаточной мере отражает соотношение амплитуд при разных частотах.

Первое из этих предположений имеет некоторую неточность. Механическое сопротивление микрофона представляет собой жесткость только в области нижних частот (см. приложение 2). На частотах выше резонансной характеристика определяется реактивной составляющей механического сопротивления, а также потерями, которые зависят от частоты и амплитуды входного сигнала. В этой области частот амплитудная характеристика близка к линейной. Высокочастотные звуки речи проходят через микрофон практически без искажений.

Второе предположение в принципе не вызывает возражений. Частотная характеристика, снятая при заданном звуковом давлении, действительно отражает соотношение амплитуд на разных частотах, в этом, собственно, суть частотной характеристики. Но использование частотной характеристики, снятой при уровнях на входе, равных среднему суммарному уровню речи, вызывает сомнение по следующим причинам:

а) взаимное влияние одних сигналов при их совместном прохождении через НЗ проявляется не только в случае, когда чувствительность этого устройства для одного сигнала существенно выше, чем для другого, но и при разнице амплитуд на входе (см. разд. 4.3 и 5.3 и рис. 5.4). Для определения области частот, которая оказывает решающее влияние на амплитудные характеристики на всех других частотах, было бы правильнее выбирать частотную характеристику не чувствительности, а отдачи и снятую не при постоянном звуковом давлении на входе, а при давлениях, соответствующих среднестатистическим уровням речи в частотных полосах;

б) чем выше уровень на входе, выбранный для измерения частотных характеристик чувствительности, тем уровень на выходе ближе к порогу верхнего ограничения, тем равномернее частотные характеристики, тем в итоге будет получена меньшая нелинейность амплитудных характеристик. При низких уровнях на входе частотные характеристики микрофонов, особенно микрофонов с большой нелинейностью, отличаются значительной неравномерностью. Так, например, характеристика микрофона МК-10 при звуковых давлениях 0,07—0,2 Н/м^2 (что соответствует средним уровням значительного числа согласных звуков) имеет один узкий пик (см. приложение 2). При этом частоты, лежащие за пределами этого пика, в том числе ниже 1000 Гц, практически не воспроизводятся.

Принятый метод получения амплитудных характеристик для разных частот не позволяет учесть эти искажения. И в данном случае было бы точнее использовать для параллельного переноса частотную характеристику отдачи, снятую при разных звуковых давлениях, и область максимума определять по ней.

Список литературы

1. **Соловьев Н. Н.** Измерительная техника в проводной связи. Ч. 3. М., «Связь», 1971.
2. **ГОСТ** 7152—68. Микрофоны угольные общего применения. Методы электроакустических испытаний.
3. **Бабуркин В. Н., Гензель Г. С., Павлов Н. Н.** Электроакустика и радиовещание. М., «Связь», 1967.
4. **ГОСТ** 7223—64. Микрофоны и громкоговорители. Методы электроакустических испытаний.
5. **ГОСТ** 7152—74. Микрофоны угольные общего применения. Методы измерений.
6. **ГОСТ** 9686—68. Аппараты телефонные общего применения для АТС.

7. ГОСТ 7153—68. Аппараты телефонные общего применения. Методы испытаний.
8. ГОСТ 6343—74. Телефоны. Методы электроакустических испытаний.
9. Материалы МККТ, 1937/1938. Передача. Документ № 72, вопрос № 14.
10. **Беранек Л.** Акустические измерения. М., ИИЛ, 1952. 626 с.
11. **Сапожков М. А.** Суммирование нелинейных искажений. — «ЖТФ», 1947, вып. 10, т. 17.
12. **Дрейзен И. Г.** Электроакустика и звуковое вещание. М., «Связь», 1961.
13. **Скучик Е.** Основы акустики. Ч. 2. М., ИИЛ, 1959.
14. **Белкин Б. Г.** Измерение нелинейных искажений в громкоговорителях. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., НИКФИ, 1954.
15. **Белкин Б. Г.** Об измерениях нелинейных искажений в громкоговорителях методом инфразвуковой модуляции. — «Акустический журнал», 1955, т. 1, вып. 1.
16. **Журавлев В. М.** Оценка инфразвукового метода измерения нелинейных искажений, вносимых громкоговорителями. — «Труды Ленинградского института киноинженеров», 1961, вып. VII.
17. **Журавлев В. М.** Методы измерения нелинейных искажений применительно к громкоговорителям — «Информационный бюллетень», 1960, № 1. ЦКБ Министерства культуры СССР.
18. **Хваливицкий С. И.** Анализ методов оценки нелинейных искажений. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1952.
19. **Журавлев В. М.** Метод измерения нелинейных искажений с помощью полос шума. — «Техника кино и телевидения», 1963, № 7.
20. **Белкин Б. Г., Борк А. А.** Соответствия между коэффициентами нелинейных искажений, измеренными на шумовых и синусоидальных тонах. — «Техника кино и телевидения», 1968, № 7.
21. **Рубичев Н. А.** О соотношении между коэффициентами нелинейных искажений, измеренных на шумовом и синусоидальном сигналах. — «Техника кино и телевидения», 1969, № 11.
22. **Вольф В. М.** Динамический метод исследования нелинейных искажений — «Радиотехника», 1953, т. 8, № 2.
23. ГОСТ 13492—68. Микрофоны угольные. Общетехнические требования.
24. **Белкин Б. Г., Борк А. А., Молодая Н. Т.** Измерение нелинейных искажений в громкоговорителях и определение их номинальной мощности. — «Техника кино и телевидения», 1966, № 6.
25. **Бренерман Ю. Б., Розенберг В. Я., Рубичев Н. А.** Новый критерий оценки искажений при прохождении сигналов через нелинейные безынерционные системы. — «Исследования в области радиотехнических измерений». Труды метрологических институтов СССР, 1967, вып. 94 (154).
26. **Репина О. И.** Пути улучшения разговорного тракта телефонного аппарата. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1961. (ВКАС).
27. **Репина О. И.** Влияние амплитудной характеристики телефонного тракта на разборчивость речи и помехи. — «Электросвязь», 1971, № 11.
28. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1962. 320 с.
29. **Варшавский Л. А.** Доклад на секции Акустической комиссии АН СССР. Л., 1951.
30. **Покровский Н. Б.** Расчет и измерения разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962. 391 с.
31. ГОСТ 8031—56. Тональный метод измерения разборчивости речи.
32. **Абрамов К. К.** и др. Специальные измерения в проводной связи. М., «Связь», 1965.
33. ГОСТ 13491—68. Телефоны электромагнитные для ТА. Общие технические требования.
34. **Ваксман С. Я.** О дискретных методах оценки нелинейных искажений. — «Вопросы радиоэлектроники». ТПС. М., 1974, вып. 6.

7

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ И РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)

7.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

По вопросу о влиянии нелинейных искажений на качество звучания речи и ее разборчивость в СССР и в зарубежных странах проведено значительное число исследований*. Они проводились для различных целей и в разных условиях. Большинство исследований проводилось в условиях, существенно отличающихся от тех, в которых работают НЧ телефонные тракты, а это решающим образом влияет на степень вредного воздействия их на качество передачи речи. Кроме того, имелись различия и в характере вводимых в тракт искажений и принятой меры оценки их величины.

Хотя цифровые данные, полученные при этих исследованиях, не могут являться основанием для предъявления требований к НЧ телефонным трактам и аппаратам в части допустимых величин нелинейных искажений, они представляют значительный интерес с точки зрения общих зависимостей и закономерностей. Кроме того, по ним прослеживается явно выраженная зависимость полученных результатов от условий эксперимента, которые часто исключают возможность распространения полученных зависимостей на смежные области, а это иногда имеет место.

7.2. ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ

Для высококачественной передачи речи и особенно музыки продукты нелинейности играют существенную роль. Чистота звучания хора, оркестра и отдельных музыкальных инструментов не может быть обеспечена при наличии заметных продуктов нелинейности, придающих звучанию хриплость, искажающих тембр.

Достижение чистоты и натуральности звучания с точки зрения технического осуществления является более высокой ступенью, чем достижение хорошей разборчивости речи. Решение этой задачи связано с значительными трудностями и на современном уровне техники посильно только высококачественным трактам, где нет таких жестких ограничений, как при простой телефонной связи, в отношении диапазона частот, усиления, сложности устройств, габаритов, стоимости и т. д. Однако это не значит, что указанные

* В интересах всестороннего освещения вопроса здесь по возможности полно рассматриваются публикации на эту тему, в том числе довольно давние.

проблемы не имеют значения для НЧ телефонной связи. Их роль особенно возросла в связи с общим повышением требований к качеству передачи, а также с применением синтетической телефонии. Натуральность и чистота передачи в степени, позволяющей узнать собеседника по голосу, имеет также важное значение.

Результаты исследования влияния продуктов нелинейности на качество передачи речи изложены в ряде работ, например в [3—6]. Во всех этих работах необходимая величина нелинейных искажений, оцениваемая коэффициентом гармоник, создавалась путем смещения искаженной и неискаженной передачи в нужных пропорциях и оценивалась по степени заметности большим числом экспертов. Однако результаты экспериментов носят противоречивый характер. Так, например, согласно [3—5] снижение качества передачи зависит от характера нелинейных искажений, при этом кубические искажения заметнее для слуха, чем квадратичные. Испытания показали также, что между величиной коэффициента нелинейных искажений и его субъективным восприятием нет однозначной зависимости.

Исследования, проведенные научно-исследовательским институтом Министерства связи СССР совместно с кафедрами радиовещания и акустики Московского и Ленинградского институтов связи [6], дали иные результаты, согласно которым интегральная абонентская оценка качества передачи определяется только величиной коэффициента гармоник и не зависит от их вида (квадратичные, кубические, смешанные). Аналогичные результаты получены в [35]. Исследования [6] были положены в основу норм на допустимые коэффициенты нелинейных искажений в трактах широковещания различных классов качества [7].

Расхождения в результатах экспериментальных исследований влияния гармоник на качество передачи речи могут быть объяснены расхождениями в способах создания и выделения нелинейных искажений, определения их величины (при каком уровне сигнала). В зависимости от того, насколько тщательно отделены продукты нелинейности, вводимые при испытаниях в тракт передачи, от вызвавшей их нелинейности динамических характеристик могут быть получены различные результаты. Если рассматривать влияние гармоник с позиций теории разборчивости речи, то в случае равномерных характеристик тракта передачи безразлично, в какую область частот они попадают и, следовательно, безразлично, находится гармоника на расстоянии одной октавы (вторая гармоника) или 1,5 октавы (третья гармоника) от основной частоты. В этом смысле результаты работ [6] представляются более достоверными. Согласно этим данным для тракта с полосой частот 200—4000 Гц без заметного снижения качества передачи допустимо наличие в тракте 7% гармоник при уровнях от номинального до половины номинального и 3,6% при уровнях ниже половины номинального. Однако следует иметь в виду, что гармоники в чистом виде в отрыве от вызвавшей их нелинейности никогда не имеют места в реальных трактах. Каждому типу нелинейности присущ

собственный допустимый коэффициент гармоник, измеренный при заданной величине входного воздействия и ограничивающий (как вторичный показатель) допустимую величину этих искажений.

7.3. ВЛИЯНИЕ ГАРМОНИК И КОМБИНАЦИОННЫХ ТОНОВ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

В работе [8] изучалось влияние четных гармоник на разборчивость речи в трактах с обычными телефонными аппаратами при работе через линию с затуханием 30 дБ и в широкополосных трактах. Заданный процент гармоник создавался путем смешивания передачи с той же передачей, но при отсутствии в ней четных гармоник, что достигалось с помощью тщательно симметрированного двухтактного генератора.

Результаты измерений, проведенных на обычном телефонном тракте, показали, что в пределах коэффициента гармоник до 200% (коэффициент смешения 0,7) слоговая разборчивость падает медленно. При введении коэффициента гармоник 100% разборчивость падает с 68 до 61% и при коэффициенте гармоник 200% она уменьшается до 55%. По мере дальнейшего увеличения процента гармоник разборчивость снижается быстрее, но даже при коэффициенте гармоник, равном бесконечности, что соответствует отсутствию основных составляющих, разборчивость не падает до нуля, а составляет около 10%. В высококачественном тракте влияние гармоник сказывается сильнее. Изменение окраски звука наблюдалось уже при коэффициенте нелинейных искажений 5%. Автор пришел к выводу, что коэффициент гармоник не может служить мерой для оценки вреда от нелинейных искажений; надо учитывать зависимость затухания от мощности сигнала.

В работе [9] исследовалось влияние искажений от железа на качество и разборчивость речи. При экспериментах для создания искажений нужной величины использовались катушки самоиндукции с железным сердечником. Установлено, что потеря слоговой разборчивости от искажений незначительна. Даже при полном искажении неразборчивость повышалась всего на 13% по сравнению с передачей без искажений. Влияние нечетных продуктов нелинейности, образующихся при искажениях типа гистерезисной петли, сказывается на окраске звука, но мало влияет на разборчивость. Это совпадает с результатами опытов Люшена [8] для четных гармоник. Явления, связанные с восприятием речи при полном отсутствии основных составляющих, могут быть объяснены на основе способности уха слушать огибающую процесса с учетом фаз частичных тонов [10].

7.4. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО АМПЛИТУДНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА КАЧЕСТВО И РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ШУМА

Работа [14] имела целью установление норм и качественных показателей для каналов высокочастотного телефонирования в условиях влияния нелинейных и частотных искажений. Влияние

симметричного ограничения больших амплитуд изучалось при отсутствии шума. Компенсации снижения громкости, вызванного амплитудным ограничением, не производилось. Качественные испытания показали, что при ограничении прежде всего наблюдаются искажения тембра гласных звуков, которые вначале обнаруживаются только при сравнении с неискаженной передачей, а затем и согласных звуков.

Результаты артикуляционных измерений приведены на рис. 7.1; верхние кривые относятся к широкополосному тракту и двум разным ограничителям, нижняя кривая — к тракту с обычными телефонными аппаратами. Для телефонного тракта при ограничении 17—22 дБ снижение разборчивости не превышало 1%.

В работах [11, 12] амплитудное ограничение исследовалось на тракте с полосой частот 300—2700 Гц при отсутствии шумов. Снижение громкости, вызванное ограничением, компенсировалось пу-

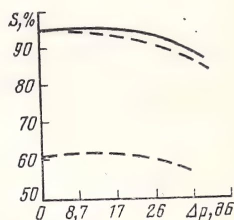


Рис. 7.1. Зависимости слоговой разборчивости речи S от верхнего амплитудного ограничения для широкополосного (верхние кривые) и телефонного (нижняя кривая) трактов

тем введения дополнительного усиления, которое доходило до 26 дБ. Основная цель исследований — определение возможности и целесообразности применения ограничителей в дальней связи и выработка требований к ним.

Из приведенных в работе характеристик видно, что при верхнем ограничении до 9 дБ коэффициент гармоник быстро растет, примерно до 20%, при этом разборчивость снижается на 2%; при дальнейшем увеличении ограничения до 26 дБ он повышается с 20 до 22%, т. е. всего на 2%. Вместе с тем на этом участке сравнительно медленного роста коэффициента гармоник наблюдается наиболее быстрое падение слоговой разборчивости с 86 до 66%, т. е. на 20%. Это указывает на то, что величина коэффициента гармоник и его приращение не связаны однозначно с разборчивостью речи, т. е. не определяют ее.

В работах [11—12], кроме того, установлено, что ограничение снизу (по минимуму) меньше влияет на громкость, чем ограничение сверху (по максимуму), но больше влияет на разборчивость речи. При ограничении снизу на 9 дБ слоговая разборчивость снижается на 1% и при ограничении на 17 дБ — на 24%. Нелинейные искажения влияют тем меньше, чем у́же полоса частот.

В [16] повторены опыты Штреккера, но на базе более совершенной аппаратуры. Измерения проводились на тракте с полосой частот 160—3650 Гц в условиях отсутствия шумов. Полученные результаты несколько выше, чем у Штреккера, но характер зави-

симости тот же. Были проведены эксперименты также на тракте, имеющем подъем до ограничителя 6 дБ/окт и такой же спад в приемнике. Установлено, что при такой характеристике допустимо без снижения разборчивости верхнее двухполупериодное ограничение до 23 дБ. В других источниках [25, 28, 32] приводятся аналогичные данные. Из них следует, что тенденция 6 дБ/окт близка к оптимальной.

При бóльшей величине тенденции и наличии амплитудного ограничения происходит заметное искажение высокочастотных звуков речи, а при меньшей тенденции — низкочастотных составляющих. Согласно [32] заметный выигрыш от подъема верхних частот наблюдается только в пределах отношения сигнал/помеха от 6 до 30 дБ, а в ряде случаев и в меньшем диапазоне.

7.5. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО АМПЛИТУДНОГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ В УСЛОВИЯХ ШУМА

Работа [13] проводилась в течение ряда лет и имела целью изучить влияние амплитудного ограничения в условиях шумов по спектру и уровню (110 дБ), близких к самолетным. Мерой ограничения служило уменьшение максимального пикового значения $\Delta\beta_{пик}=\beta_{\Sigma p_{пик}}-\beta_{\Sigma p_{ср}}$. Как симметричное (рис. 7.2, кривая *а*), так и асимметричное ограничения по максимуму влияют на разборчивость незначительно. Для шумостойкого микрофона ограничение уровня до 20 дБ не оказывает заметного влияния на разборчивость; при нешумостойком микрофоне и ограничении уровня на 12 дБ словесная разборчивость снижается с 80 до 70%.

При наличии запаса усиления можно путем соответствующего подбора усиления и ограничения добиться повышения разборчивости по сравнению с отсутствием ограничения. Так, например, при ограничении сверху на 24 дБ требуется повысить усиление на 13—15 дБ, чтобы получить ту же разборчивость, что и без ограничения, и таким образом получить выигрыш в усилении 9—11 дБ.

Ограничение снизу типа центральной отсечки влияет сильно; при ограничении на 2 дБ уже заметно снижение разборчивости, далее имеет место резкое падение ее и при ограничении 12 дБ разборчивость снижается до нуля (рис. 7.2, кривая *б*).

В экспериментах [24] характеристики тракта были близки к рекомендованным МККТТ для телефонной системы с искажениями. Применялось однополупериодное ограничение сверху в соответствии с характеристиками угольного микрофона и усилителей на транзисторах, когда ограничение по максимуму получается в результате ограничения режима питания. Порог ограничения устанавливался по началу срезания одной полуволны (на осциллографе) и градуировался по эффективной величине звукового давления на входе на частоте 600 Гц, а затем пересчитывался по отношению к среднестатистическому уровню речи. Потеря громкости от ограничения не компенсировалась. Тракт не вносил искажений, кроме заданных.

Ограничитель снизу создавал симметричные ограничения малых амплитуд. Выше порога ограничения амплитудная характеристика была линейной, ниже порога имела крутизну 3 и 2. Измерения проводились тренированной бригадой из пяти человек с пе-

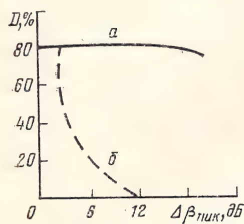


Рис. 7.2. Результаты опытов по верхнему и нижнему ограничениям

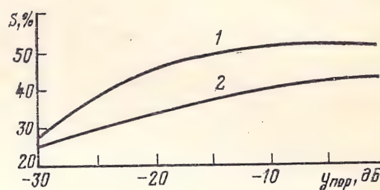


Рис. 7.3. Зависимости слоговой разборчивости S от уровня порога $y_{пор}$ верхнего однополупериодного ограничения (по отношению к среднему уровню речи) при уровне шума 75 дБ (кривая *1*) и 85 дБ (кривая *2*) для телефонного тракта

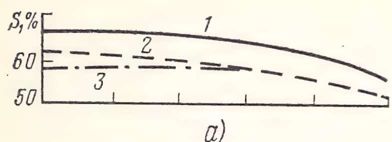
редачей на каждую измеряемую точку 1800—2400 слогов. Передача велась через искусственную кабельную линию при шумах, близких по спектру к речевым.

Зависимость слоговой разборчивости от уровня порога верхнего однополупериодного ограничения $y_{пор}$ (по отношению к среднестатистическому уровню речи) при интенсивности шума в месте приема 75 дБ (кривая *1*) и 85 дБ (кривая *2*) приведена на рис. 7.3. Из нее следует, что без сколь-либо существенной потери разборчивости речи (снижение S на 1—2%) допустимо ограничение на 10 дБ ниже среднего уровня речи. В случае форсирования речи потери при этом возрастают, например при ограничении на 20 дБ они составят 6—8%. С ростом порога ограничения снижение разборчивости становится все более заметным и тем заметнее, чем ниже уровень помех.

Кривые, отражающие зависимость слоговой разборчивости от порога нижнего (центрального) ограничения, приведены на рис. 7.4. Затухание линии составляло 43 дБ, крутизна характеристики (показатель нелинейности) ниже порога ограничения составляла $n \approx 2$, уровень шума на приеме был: а) 75 дБ, б) 85 дБ; уровень шума в месте передачи составлял для кривых: *1*—0 дБ, *2*—75 дБ, *3*—85 дБ, *4*—100 дБ. Порог ограничения определялся как уровень на входе, соответствующий точке перегиба амплитудной характеристики.

Из анализа этих кривых следует, что зависимость разборчивости от степени ограничения более резко выражена в области высоких уровней порога ограничения, близких к среднему уровню речи и особенно при отсутствии шума в месте передачи. При вы-

соких порогах ограничения (—10÷—20 дБ) и при уровне шума на приеме 85 дБ наблюдалось даже некоторое повышение разборчивости с появлением шума на передающем конце (кривые *1, 3*), а при уровне шума на передаче 100 дБ — с повышением порога ограничения. Это можно объяснить, по-видимому, влиянием шума на слабые составляющие речи при их совместном прохождении через нелинейное звено.



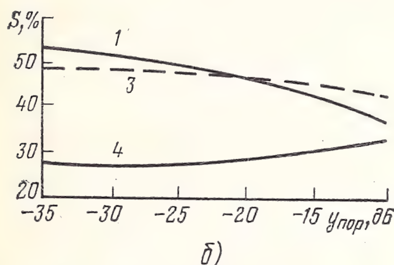


Рис. 7.4. Зависимости слоговой разборчивости речи S от уровня порога $y_{пор}$ нижнего (центрального) ограничения при $n=2$, акустическом шуме на приеме 75 дБ (*а*) и 85 дБ (*б*) и разных уровнях шума на передаче

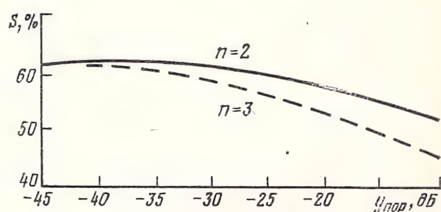


Рис. 7.5. Зависимости слоговой разборчивости речи S от уровня порога $y_{пор}$ нижнего ограничения (по отношению к среднему уровню речи)

Нижнее ограничение тем сильнее снижает разборчивость речи, чем круче характеристика ниже порога ограничения (рис. 7.5). Если принять в качестве допустимой величины снижения разборчивости 2%, то порог ограничения $y_{пор}$ должен лежать при $n=2$ не выше —9 дБ, а при $n=3$ не выше —32 дБ по отношению к среднему суммарному уровню речи. При пороге ограничения —15 дБ разборчивость падает при $n=3$ с 62 до 50%.

7.6. О КЛИППИРОВАНИИ РЕЧИ

Предельное ограничение по максимуму (клиппирование) в сочетании с соответствующим усилением, дифференцированием и интегрированием имеет большое значение для повышения помехоустойчивости трактов связи, а также позволяет получить из речи сигналы прямоугольного типа, например, при вводе их в устройства автоматического опознавания речи, вычислительные и информационные машины и т. д. В НЧ телефонных трактах клиппирование не находит применения. Однако в будущем при развитии техники микросхем и снижении их стоимости отдельные аспекты решения задач, связанных с клиппированием, возможно найдут применение в телефонных аппаратах и в телефонных трактах. Возможно использование этих решений в целях управления от голоса в громкоговорящих телефонных аппаратах. Поэтому остановимся кратко на результатах экспериментальных работ по клиппированию речи.

Вопросы влияния клиппирования на помехозащищенность трактов и разборчивость речи изучались многими авторами, например, в [19, 21, 23, 25—29, 31—34]. Ими получены в значительной мере идентичные результаты. Остановимся только на работах Ю. Г. Ростовцева [19]. Он исследовал влияние амплитудного ограничения по максимуму вплоть до предельного на звуковую раз-

борчивость речи и помехоустойчивость тракта. Результаты артикуляционных испытаний при отсутствии шумов приведены на рис. 7.6. Из него следует, что:

при простом ограничении (кривая *1*) артикуляция слабо зависит от степени ограничения. Даже при ограничении на 60 дБ она снижается всего на 8%;

если перед ограничителем включен четырехполюсник с характеристикой, имеющей подъем 6 дБ/окт, и сигнал дифференцируется (кривая *2*), разборчивость повышается; при ограничении 60 дБ снижение составляет всего 2% (вместо 8% при простом ограничении), при этом качество звучания снижается;

если после ограничителя включить интегрирующий элемент (кривая *3*), разборчивость еще несколько возрастает, но качество звучания улучшается существенно. При дифференцировании до и после ограничителя (кривая *4*) разборчивость падает, но все же остается выше, чем при простом ограничении, качество звучания плохое, последующее интегрирование восстанавливает качество.

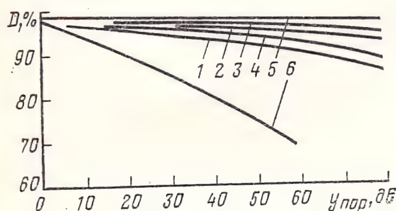


Рис. 7.6. Зависимости звуковой разборчивости D от уровня порога верхнего амплитудного ограничения при отсутствии шумов

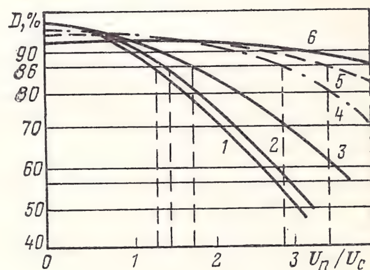


Рис. 7.7. Зависимости звуковой разборчивости D от отношения напряжений помеха/сигнал в условиях флуктуационных шумов

При сочетании интегрирования с подавлением электрических шумов аппаратуры в паузах речи можно получить независимость разборчивости от степени ограничения вплоть до 80 дБ (кривая *5*). При интегрировании до и после ограничителя (кривая 6) имеет место резкое падение разборчивости по мере роста степени ограничения.

На рис. 7.7 приведены результаты испытания ограничителя больших амплитуд при наличии флуктуационных помех. Рисунок дает зависимость звуковой разборчивости от отношения действующего значения помехи к амплитуде сигнала. При отсутствии ограничения помехоустойчивость низкая, разборчивость сильно зависит от отношения сигнал/помеха (кривая *1*), поднятие верхних частот повышает разборчивость незначительно (кривая *2*). Применение ограничителя дает уже существенный эффект (кривые *3—6*), особенно с интегрированием после ограничителя (кривая *5* с ограничением 35 дБ, кривая *6* с ограничением 60 дБ). Дифференцирование до и после ограничителя (кривая *3*), а также предварительное дифференцирование с последующим интегрированием (кривая *4*) дают меньший эффект по сравнению с одним интегрированием после ограничителя. Варианты, которые иллюстрируют кривые *6, 5, 4,* дают снижение разборчивости при отсутствии помех по сравнению с другими вариантами. Наиболее благоприятным признан вариант 5 (интегрирование после ограничения 35 дБ), дающий достаточно высокую разборчивость при малых шумах, разборчивость 86% при отношении сигнал/помеха, равном 3,5, и выигрыш в мощности по сравнению с отсутствием ограничения в 7,5 раза.

Еще бóльший эффект дает применение верхнего ограничения в шумах импульсного типа. Уже при ограничении 10 дБ система становится нечувствительной к этому виду помехи.

7.7. СЖИМАТЕЛИ И РАСШИРИТЕЛИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ И ШУМОЗАЩИЩЕННОСТЬ

Изучением влияния компрессии на отношение сигнал/помеха и разборчивость речи занимались ряд исследователей, например [17, 18, 25—28, 31, 32, 36, 37]. В большинстве из этих работ рассматривается также экспандирование. Одними из первых в области компрессии явились работы Высоцкого и Тетельбаума, в которых исследовалось для целей радиовещания влияние компрессии речи на ее разборчивость при наличии музыкально-речевой [17] и речевой [18] программ на высококачественном тракте с полосой частот 300—10 000 Гц. Уровень приема при введении ограничения регулировался до «нормальной громкости». Полученные результаты позволили авторам сделать следующие заключения:

применение предельной компрессии значительно повышает процент артикуляции в каналах связи как при помехе, воздействующей после компрессора на электрическую часть канала, так и при акустической помехе;

получающееся повышение коэффициента артикуляции эквивалентно выигрышу по амплитудам в 2,5—3 раза и по мощности в 6—9 раз;

при рациональном выполнении компрессора можно избежать снижения разборчивости от компрессии при отсутствии помехи.

Исследования, проведенные в [27] применительно к трактам широковещания при слабой компрессии ($K=1/2$), показали, что компрессия повышает разборчивость речи только при большом отношении сигнал/помеха. При малом отношении сигнал/помеха компрессия, наоборот, снижает разборчивость речи. В этом случае выигрыш в разборчивости дает расширитель, а не сжиматель. Система сжиматель — расширитель в сочетании с селективным устройством (фильтрами) в цепи управления расширителя позволяет получить значительный выигрыш в разборчивости и шумозащищенности в широком диапазоне отношений сигнал/помеха.

7.8. НЕКОТОРЫЕ ИТОГОВЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Рассмотренные выше результаты исследований влияния продуктов нелинейности на качество звучания речи и ее разборчивость позволяют установить, что:

появление гармоник и комбинационных тонов сказывается больше на окраске звука, а не на разборчивости речи, при этом чем шире полоса частот, тем влияние продуктов нелинейности больше;

качество передачи определяется только величиной коэффициента гармоник и не зависит от их типа, если гармоники вводятся в тракт в отрыве от вызвавшей их нелинейности;

гармоники как квадратичные, так и кубические влияют на разборчивость речи незначительно. Даже при коэффициенте гармоник 100% слоговая разборчивость снижалась всего с 68 до 61%;

между величиной коэффициента гармоник и разборчивостью речи нет однозначной связи. Он может служить мерой, характеризующей вред от нелинейных искажений, как вторичный, косвенный показатель только применительно к данному типу нелинейности и в заданных условиях.

Влияние амплитудного ограничения зависит от его характера (сверху, снизу, симметричное, асимметричное), характера шума и места его действия (на передаче, приеме, в линии), отношения сигнал/помеха, частотной характеристики тракта, характеристик ограничителей, принятой при измерениях меры ограничения, критерия оценки влияния искажений.

Несмотря на различия в условиях и результатах рассмотренных выше исследований, по их итогам можно сделать следующие общие заключения:

1. Ограничения по минимуму более вредны, чем ограничения по максимуму. Это объясняется тем, что при ограничении снизу из передачи исключаются в первую очередь слабые составляющие речи, т. е. наиболее информативная часть ее — согласные звуки, в то время как при ограничении по максимуму снижается только уровень наиболее громких компонентов речи.

2. Ограничение по максимуму больше влияет на качество звучания, чем на разборчивость.

3. Если верхнее ограничение не сопровождается компенсирующим потерю громкости усилением, разборчивость речи по мере роста ограничения снижается, но незначительно. Для НЧ телефонного тракта можно допустить без существенной потери разборчивости ограничение на 10 дБ ниже суммарного среднего уровня речи.

4. Если верхнее ограничение сопровождается компенсирующим усилением, применение глубокого ограничения, особенно в сочетании с подъемом частотной характеристики в сторону верхних частот, дифференцированием и интегрированием, дает значительное повышение разборчивости речи и помехозащищенности.

5. Нижнее ограничение тем сильнее снижает разборчивость речи, чем круче характеристика ниже порога ограничения и чем выше уровень этого порога. Нижнее ограничение сильнее влияет при высоком качестве передачи (малое затухание линии, низкие уровни шумов на приеме или их отсутствие). Для НЧ телефонного тракта нижнее ограничение практически недопустимо, если при крутизне характеристики $n=2$ порог ограничения лежит выше —9 дБ (к суммарному среднему уровню речи), а при $n=3$ — выше —32 дБ.

Список литературы

1. **Цеммель Г. И.** Опознавание речевых сигналов. М., «Наука», 1971.
2. **Jahowsky W.** Veröffentlichungen aus dem Gebiet der Nachrichtentechnik. 1932, N 4.
3. **Massa.** Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1933, May.

4. **Фурдуев В. В.** Акустические основы вещания. М., Связьиздат, 1960. 320 с.
5. **Braunmüle H. J., Weber W.** Akustische Zeitschrift. 1937, May, Bd. 2.
6. **Исследование** слышимости искажений в радиовещательных трактах. — Сборник статей под ред. И. Е. Горона. М., Связьиздат, 1959.
7. **ВТУ** 526—58. Каналы радиовещательные. Нормы на основные качественные показатели.
8. **Lüshen G.** Die nichtlineare Verzerrungen in langen Fernsprechkabeln und ihr Einfluβ auf die Verständlichkeit der Sprache. — «Telegraphie und Fernsprechtechnik». 1936, v. 25, N 2.
9. **Bekesy G.** Über den Einfluβ der nichtlinearen Eisenverzerrungen auf die Güte und Verständlichkeit lines Telephonie—Übertragungsistem. — «ENT», 1928, H. 6, Bd. 5.
10. **Скучик Е.** Основы акустики, т. 11. М., ИИЛ, 1959.
11. **Strecker F.** Versuche über Amplitudenbegrenzer für Vernsprechverbindungen.— «Elektrische Nachrichten Technik», 1936, Bd. 13, N 10.
12. **Strecker F.** Verständlichkeit und Lautstärke bei Frequenz und Amplitudenbegrenzung.—«Zeitschrift für technischen Physik», 1936, Bd. 17, N 12.
13. **Licklider J.** Effects of Amplitude Distortion upon the Intelligibility.—«JASA», 1946, v. 18, N 2.
14. **Сидоров Г. С.** Влияние амплитудного ограничения на качество передачи речи. — «Труды секции электроакустики и звукозаписи ВНОР», 1947.
15. **Варшавский Л. А.** Отчет по исследованию влияния амплитудных искажений на артикуляцию. НИИ МРТП, 1937—1938.
16. **Schneider H.** Die Verständlichkeit amplitudenbegrenzter Sprache.—«Frequenz», 1956, Bd. 10, N 4, N 5.
17. **Высоцкий, Тетельбаум.** Способ повышения артикуляции в каналах связи с помехами. — «ИЭСТ», 1937, № 9.
18. **Тетельбаум, Высоцкий.** Повышение коэффициента артикуляции громкоговорения при шумных аудиториях. — «ИЭСТ», 1938, № 1.
19. **Ростовцев Ю. Г.** О возможности применения в системах связи предельного амплитудного ограничения речевых сигналов. — «Электросвязь», 1958, № 6.
20. **Величкин А. Н.** Амплитудное ограничение речи. — «Акустический журнал», 1962, т. VIII, вып. 2.
21. **Ростовцев Ю. Г.** Расчет артикуляции речевых сигналов, предельно ограниченных по амплитуде, при воздействии флюктуационных помех. — «Научно-технический сборник ОНТИ», 1958.
22. **Резвяков А. П.** Влияние нелинейности на качество дальней телефонной связи. М., Связьиздат, 1959.
23. **Licklider J., Pollak J.** Effects of Differention, Integration and Infinite Peak Clipping upon the Inteligibility of Speech.—«JASA», 1948, v. 20, N 1.
24. **Репина О. И.** Пути улучшения разговорного тракта полевого телефонного аппарата. Канд. диссертация. М., 1959.
25. **Hässler G.** Sprachübertragung mit Dinamikkompression.—«Fernmeldetechnische Zeitschrift», 1954, N 7.
26. **Jänke M., Prenzel E., Speer W.** Dinamikpresser und Dehner für Fernmeldeverbindung.—«Fernmeldezeitschrift», 1953, N 6.
27. **Barrasch G.** Der Einfluβ von Dinamikkompression und Expansion auf die Sprachverständlichkeit.—«Hochfrequenztechnik und Elektroakustik», 1961, N 70.
28. **Rupp H.** Die Störabstandverbesserung bei Höhenabhebung, sowie bei Verwendung eines Silbenkompanders.—«NTZ», 1962, N 9.
29. **Яковлев С. А.** Некоторые характеристики сигналов, предельно ограниченных по амплитуде в преобразованном спектре частот. — «Научно-технический сборник». Государственный союзный научно-исследовательский институт, 1958, вып. 6.
30. **Гаршман В. А., Кириллов Н. Е.** Экспериментальное исследование статистических характеристик ограниченной речи. — «Научно-технический сборник». Государственный союзный научно-исследовательский институт, 1958, вып. 6.
31. **Немировский М. С.** Применение компрессии сигналов для целей снижения помехоустойчивости. — «Научно-технический сборник». Государственный союзный научно-исследовательский институт, 1958, вып. 6.

32. **Штагер В. В.** Сжиматели-расширители и их применение в технике дальней связи. М., Связьиздат, 1955.
33. **David E. E., McDonald.** A Bit Squerzing Technique Applied to Speech Signals.—«Convention Record IRE», 1956, p. 4.
34. **Dukes Y. M.** The Effect of Several Amplitude Limitation on Certain Tipes of Rondom.—«Proc. IEE», 1955, N 1, p. 102.
35. **Вемян Г. В.** Качество телефонной передачи и его оценка. М., «Связь», 1970. 224 с.
36. **Völz H.** Beitrag zur reziproken Dynamikregelung.—«Hochfrequenztechnik und Elektroak.», 1957, B. 67, N 3, S. 87.
37. **Moorthat—Pick W.** Dinamik—Expander—Schaltung.—«Radio Mentor», 1957, N 7, p. 457.

8

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ И ПОМЕХИ

8.1. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При прохождении сигналов через нелинейное устройство происходят, как это показано в гл. 4 и 5, следующие их изменения:

1. Изменяются соотношения между уровнями составляющих сигнала, а также между уровнями сигнала и шума при их совместном прохождении через нелинейное звено (НЗ).

2. Изменяются соотношения между уровнями сигналов при их разновременном или раздельном прохождении через НЗ.

3. Появляются продукты нелинейности (гармоники, комбинационные частоты), которые во входном сигнале отсутствовали.

4. Происходят колебания амплитуды слабого сигнала в такт с амплитудой сильного сигнала при их совместном прохождении через НЗ.

В данной главе будет рассмотрено влияние на разборчивость речи только искажений, указанных в п. 2, оказывающих на разборчивость наибольшее влияние.

Продукты нелинейности (гармоники, комбинационные составляющие) оказывают влияние на тембр звучания, а на разборчивость влияют незначительно (см. гл. 7). Как показано в гл. 4, 5, соотношения между уровнями сигнала и шума после совместного прохождения их через нелинейное звено изменяются незначительно и при расчетах это изменение может практически не учитываться. Искажения, указанные в п. 4, проявляются сравнительно редко и в большинстве случаев, особенно при гладких помехах, не влияют на разборчивость речи сколь-либо существенно.

Наиболее существенным результатом взаимного влияния компонентов сложного сигнала друг на друга является деформация амплитудных характеристик слабых составляющих под влиянием

сопутствующих сильных. Нелинейность в области максимума выходного спектра вызывает нелинейность того же типа в остальной части спектра. Это должно учитываться при измерении амплитудных характеристик, или в амплитудные характеристики, снятые на отдельных частотах, должны быть внесены соответствующие коррективы расчетным путем. При дальнейшем изложении материала предполагается, что амплитудные характеристики для каждой рассматриваемой частоты или полосы частот получены с учетом этого фактора.

8.2. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТДЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ ЦЕПИ НА ШУМОЗАЩИЩЕННОСТЬ ТРАКТА

Часто при расчете трактов связи, в том числе их узлов, содержащих нелинейные устройства порогового типа, требуется определить суммарную шумозащищенность тракта (или отдельно передающей и приемной частей его) и влияние на эту шумозащищенность частотных характеристик электрических и акустических звеньев разговорных цепей и цепей управления, например влияние частотных характеристик микрофона на отношение сигнал/помеха и суммарную шумозащищенность от помехи определенного вида или влияние частотной коррекции в цепи управления громкоговорящих ТА на шумозащищенность аппарата. Поэтому возникает необходимость перехода от электрических эффектов, создаваемых помехой и сигналом на выходе отдельных звеньев, к акустическим входным воздействиям, соответствующим этим эффектам.

Если отношение между суммарными уровнями полезного сигнала и помехи после прохождения ими какого-то звена увеличилось, например, на 5 дБ, это значит, что устройство, содержащее такое звено, сможет работать при прочих равных условиях в шумах с входным уровнем, на 5 дБ большим, чем при отсутствии звена. В данном случае шумозащищенность повысилась на 5 дБ. Величину изменения шумозащищенности в результате прохождения сигнала с уровнем $\beta_{\text{с.вх}}$ и помехи с уровнем $\beta_{\text{п.вх}}$ через звено, коэффициент передачи которого равен $S_{\text{зв}}$, можно определить следующим образом. Пусть отношение сигнал/помеха на выходе звена, выраженное через разность уровней, будет

$$\Delta\beta_{\Sigma\,\text{с/п}} = \sum\nolimits_{(+)} (\beta_{\text{с.вх}} + S_{\text{зв}}) - \sum\nolimits_{(+)} (\beta_{\text{п.вх}} + S_{\text{зв}}) =$$

$$= \left[\sum\nolimits_{(+)} \beta_{\text{с.вх}} - a_{\Sigma\,\text{зв.с}}\right] - \left[\sum\nolimits_{(+)} \beta_{\text{п.вх}} - a_{\Sigma\,\text{зв.п}}\right] =$$

$$= \sum\nolimits_{(+)} \beta_{\text{с.вх}} - \sum\nolimits_{(+)} \beta_{\text{п.вх}} + (a_{\Sigma\,\text{зв.п}} - a_{\Sigma\text{зв.с}}).$$

Здесь $(+)$ означает суммирование по интенсивности: $\beta_1 (+) \beta_2 = 10 \lg (10^{0,1\beta_1} + 10^{0,1\beta_2})$. (График сложения по интенсивности дан в приложении 3).

В отличие от затухания a на отдельной частоте или в частотной полосе, суммарное затухание сигнала и помехи будем обозначать со знаком суммы через a_Σ.

Таким образом, после прохождения звена разность уровней сигнала и помехи изменится на величину разности затуханий звена для суммарных величин сигнала и помехи, приведенную к входу:

$$a_{\Sigma\ \text{зв.п}} - a_{\Sigma\ \text{зв.р}} = \left[\sum_{(+)} \beta_{\text{вх.п}} - \sum_{(+)} (\beta_{\text{вх.п}} + S_{\text{зв}})\right] - \\ - \left[\sum_{(+)} \beta_{\text{вх.с}} - \sum_{(+)} (\beta_{\text{вх.с}} + S_{\text{зв}})\right].$$

Такой прием приведения разности уровней ко входу является в какой-то мере искусственным, но логически обоснованным и удобным. Он позволяет оценить эффект от применения тех или иных акустических и электрических элементов в величинах изменения помехозащищенности. Аналогично шум в усилителях приводится к входному сопротивлению. При расчетах разборчивости речи затухание шумозащищенности микрофона на данной частоте обычно вычитается из уровня акустического шума в месте расположения микрофона, хотя, строго говоря, оно характеризует отношение напряжений на выходе микрофона.

8.3. УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ УРОВНЕМ ОЩУЩЕНИЯ, ПОКАЗАТЕЛЕМ НЕЛИНЕЙНОСТИ И ПОРОГОМ СЛЫШИМОСТИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

При передаче речи через линейную систему при любых преобразованиях ее в этой системе амплитудное распределение на выходе тракта не изменяется по сравнению с распределением перед микрофоном. Поэтому при расчетах разборчивости речевого сигнала пользуются соотношениями, установленными экспериментально в результате статистических исследований речи.

Нелинейная система искажает первоначальный закон распределения уровней речи (и формантных составляющих речи); в зависимости от формы амплитудной характеристики происходит растягивание или сжатие динамического диапазона речи, и поэтому коэффициент восприятия ее ухом слушающего уже не будет соответствовать восприятию естественной речи. Известная зависимость коэффициента восприятия от уровня ощущения $P=\varphi(E)$, лежащая в основе расчетов разборчивости речи для линейных систем, изменится. Эти изменения можно учесть, если перестроить кривые вероятности восприятия в соответствии с изменением динамического диапазона для каждой расчетной полосы частот, как это предложено, например, в [3]. Метод очень громоздок, особенно в случае амплитудных характеристик с несколькими участками разной крутизны.

Для расчета разборчивости речи с учетом нелинейности амплитудных характеристик может быть применен значительно более простой способ, предложенный Л. А. Варшавским [1] и базирующийся на следующих соображениях. Если порогу слышимости на выходе тракта соответствует порог слышимости на входе β_{x0}, то

на выходе могут быть услышаны только те составляющие речи, уровень которых на входе выше β_{x0}. Уровень ощущения в расчетной полосе частот полностью определяется превышением уровня речи $\beta_р$ на входе тракта (или на входе НЗ) над порогом слышимости β_{x0}, приведенным с выхода тракта на его вход (или вход звена):

$$E = \beta_р - \beta_{x\,0}. \tag{8.1}$$

До прохождения нелинейного звена амплитудное распределение передаваемой речи не подвергается изменениям, поэтому при расчетах разборчивости речи таким способом можно пользоваться обычными кривыми вероятности, установленными для естественной речи и используемыми при расчетах линейных систем.

При наличии амплитудной характеристики нахождение β_{x0} сводится к простому отсчету этой величины по имеющемуся графику. Ее определяют как абсциссу, соответствующую уровню порога слышимости, приведенному с выхода тракта на выход нелинейного устройства. Однако для аналитических целей требуется установить математическую связь между величиной β_{x0}, чувствительностью (или отдачей) устройства и формой амплитудной характеристики, выразив последнюю в виде закона ее изменения. Для этой цели амплитудную характеристику можно аппроксимировать любым подходящим в каждом отдельном случае уравнением (см. гл. 3). Наиболее удобной для расчетов и вместе с тем универсальной формой аппроксимации является показательная функция (рис. 8.1), а точнее, ее логарифмическая форма, позволяющая установить связь между уровнями входного воздействия и выходного эффекта через «показатель нелинейности» — крутизну амплитудной характеристики.

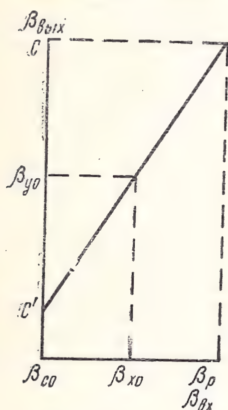


Рис. 8.1. Определение порога слышимости по входу

Предварительно следует выбрать уровень на входе, который можно считать условно начальным или исходным уровнем и для которого определяется или задается отдача нелинейного устройства. Уровень можно выбрать или в области малых входных воздействий, например где-то вблизи нижней границы динамического диапазона, ниже β_{x0}, или в области выше β_{x0}, например при среднестатистическом уровне речи $\beta_р$. Последний вариант в большинстве случаев является более удобным для практических расчетов. Он будет в дальнейшем принят в качестве основного.

В соответствии с ур-нием (8.1) определение уровня ощущения речи сводится к нахождению величины β_{x0}. Установим связь ее с параметрами амплитудной характеристики. Если в качестве начальных величин приняты уровень на входе нелинейного звена

$\beta'_{c0} < \beta_{x0}$ и соответствующий ему уровень отдачи C', то

$$\beta_{x\,0} = \frac{\beta_{y\,0} - C'}{n'}, \qquad (8.2)$$

а если $\beta_{c0} > \beta_{x0}$, например $\beta_{c0} = \beta_{р}$, то при уровне отдачи C

$$\beta_{x\,0} = \beta_{р} - \frac{C - \beta_{y\,0}}{n}. \qquad (8.3)$$

В ур-ниях (8.1) и (8.2) приняты следующие обозначения:

n' — показатель нелинейности, т. е. крутизна логарифмической амплитудной характеристики на участке между β_{c0} и β_{x0};

n — то же, на участке $\beta_{р}$ и β_{x0}: $n = 20\lg y / 20\lg x$. В дальнейшем понятия «показатель нелинейности» и крутизна амплитудной характеристики будут применяться как равнозначные. При этом имеется в виду амплитудная характеристика, выражающая зависимость между входным и выходным уровнями;

C и C' — уровни отдачи НЗ. Если величина C определена при $\beta_{р}$, то $C = \beta_{р} + S_{н.з}$, где $S_{н.з}$ — коэффициент передачи НЗ при уровне на входе, равном $\beta_{р}$; β_{y0} — уровень порога слышимости под заглушкой телефона, приведенный с выхода тракта на выход НЗ, связанный с уровнем шума под заглушкой $\beta_{ш.з}$ (в ухе) слушающего соотношением $\beta_{y0} = (\beta_{ш.з} (+) x_0) + a$, где a — сумма затуханий и усилений в тракте после НЗ; x_0 — порог слышимости по давлению в тишине. В дальнейшем будет рассматриваться случай, когда порог слышимости определяется помехой и $\beta_{ш.з} \gg x_0$. Тогда

$$\beta_{y\,0} = \beta_{ш.з} + a. \qquad (8.4)$$

Величина $\beta_{ш.з}$, а вместе с ней и β_{y0} определяются только шумами, не проходящими через нелинейное звено, например акустическими шумами, а если НЗ включено на передающем конце тракта, то и линейными помехами.

Для НЧ телефонного тракта с нелинейностью в микрофоне

$$a = a_{л} + a_{пер} + a_{пр} - S_{т}, \qquad (8.5)$$

где $a_{л}$ — затухание линии; $a_{пер}$ и $a_{пр}$ — затухания схемы аппарата на прием и передачу; $S_{т}$ — коэффициент передачи телефона.

В соответствии с ур-ниями (8.1)—(8.3) уровень ощущения речи выразится соотношениями:

$$E = \beta_{р} - \beta_{x\,0} = \beta_{р} - \frac{B_{y\,0} - C'}{n'}, \qquad (8.6)$$

$$E = \beta_{р} - \beta_{x\,0} = \frac{C - \beta_{y\,0}}{n}. \qquad (8.7)$$

Из этих уравнений следует, что уровень ощущения, а следовательно, и разборчивость речи тем больше, чем больше крутизна амплитудной характеристики n' на участке ниже порога слышимости β_{y0}, приведенного с выхода тракта на выход нелинейного

звена, и чем меньше крутизна характеристики n на участке выше β_{y0}.

На рис. 8.2 приведены амплитудные характеристики с одинаковой отдачей C_p при среднем уровне речи β_p на входе НЗ и с одинаковой величиной β_{y0}, т. е. одинаковым уровнем помех в ухе слушающего. Из этих характеристик следует, что ломаная амплитудная характеристика при $n<1$ (компрессия) выше β_{x0} и при $n>1$ ниже β_{x0} обеспечивает бóльшую величину $E=\beta_p-\beta_{x0}$, чем линейная характеристика ($n=1$, $\alpha=45°$).

В области нижнего ограничения при $n>1$ разборчивость речи не зависит однозначно от крутизны амплитудной характеристики на участке, где находится порог слышимости (рис. 8.3). При уров-

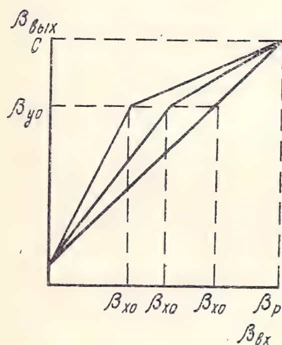


Рис. 8.2. Амплитудные характеристики с одинаковой отдачей C_p при среднем уровне речи и разными порогами слышимости по входу

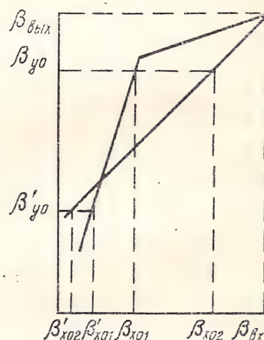


Рис. 8.3. Неоднозначная зависимость порога слышимости по входу от крутизны амплитудной характеристики

не порога слышимости на выходе нелинейного звена, равном β_{y0}, уровень ощущения будет выше (β_{x0} меньше) у нелинейной характеристики (ломаная характеристика), чем у линейной (с $n=1$); при уровне порога слышимости β'_{y0} наблюдается обратная картина. Все зависит от того, на каком участке амплитудной характеристики находится приведенный с выхода порог слышимости. Чем меньше величина β_{x0}, соответствующая заданному уровню β_{y0}, тем выше разборчивость речи. Все определяется чувствительностью НЗ на пороге слышимости. Поэтому основная задача при расчетах разборчивости речи с учетом нелинейности амплитудной характеристики сводится к определению уровня порога слышимости по входу.

Форма амплитудной характеристики выше порога слышимости не играет существенной роли в восприятии речи, так как если речевые составляющие лежат выше β_{x0}, они будут услышаны. Разборчивость речи не изменится по сравнению с линейной системой, имеющей ту же величину β_{x0}, поскольку деформация амплитудно-

го распределения выше порога слышимости не изменит вероятности восприятия. Поэтому, когда амплитудная характеристика выше β_{x0} имеет меняющуюся крутизну, зависимости (8.6) и (8.7) могут быть выражены через крутизну спрямленной амплитудной характеристики, проведенной между точками $\beta_р$ и β_{x0} (рис. 8.4*а*).

На рис. 8.2 приведен идеальный случай, когда точка перегиба амплитудной характеристики совпадает с порогом слышимости, что в действительности является исключением. Если β_{x0} не совпадает с порогом ограничения, на помощь приходит спрямленная

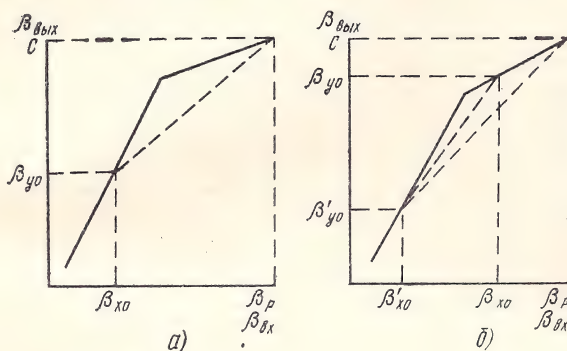


Рис. 8.4. Спрямление амплитудных характеристик

характеристика (пунктирная прямая) как при расчетах уровней ощущения речи (рис. 8.4*а*), так и при анализе зависимости разности порогов слышимости по входу тракта от нелинейности амплитудной характеристики (рис. 8.4*б*) при помехах различного рода. Для единичного случая достаточно произвести простой отсчет интересующей нас величины $\beta_р—\beta_{x0}$ или $\beta_{x0}—\beta'_{x0}$ прямо по амплитудной характеристике.

В общем случае, когда продукты нелинейности не представляют интереса, амплитудная и динамическая характеристики могут быть аппроксимированы через крутизну (показатель нелинейности) n спрямленной характеристики $y=x^n$.

Нелинейное звено с ломаной амплитудной характеристикой при $n>1$ ниже порога слышимости может служить для подавления помехи, проходящей через это звено, если уровень помехи находится на участке ниже β_{x0}. Это осуществимо только в случае, когда речь и помеха проходят через НЗ не одновременно или одновременно, но через разные НЗ, например в случае помех от местного эффекта, когда речь проходит через микрофон аппарата на передающем конце тракта, а шумы местного эффекта — через микрофон приемного аппарата. Аналогичная картина имеет место и в случае помех от переходных разговоров, которые проходят к уху слушающего через НЗ (микрофон), включенный на входе другого тракта. Если шумы с места передачи проходят че-

рез микрофон вместе с речью, приведенные выше формулы неприменимы.

Величина β_{x0} определялась выше только с учетом шумов и помех, поступающих в тракт после нелинейного звена; шум, проходящий через НЗ, не принимался во внимание. Если этот шум ($\beta_{ш.вх}$), например акустический шум помещения передачи, а также линейные электрические помехи, когда НЗ включено на выходе линии, играет заметную роль, суммарный порог слышимости по входу тракта будет равен $\beta_{x0}(+)\beta_{ш.вх}$.

8.4. ВЛИЯНИЕ НИЖНЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

В предыдущем разделе рассмотрены случаи, когда нижний загиб амплитудной характеристики (участок с $n>1$) лежит ниже порога слышимости, приведенного с выхода тракта на его вход или вход НЗ. В этом случае подъем амплитудной характеристики

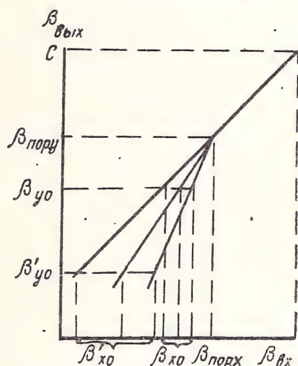


Рис. 8.5. Влияние крутизны амплитудной характеристики на уровень порога слышимости, приведенного с выхода *НЗ* на его вход

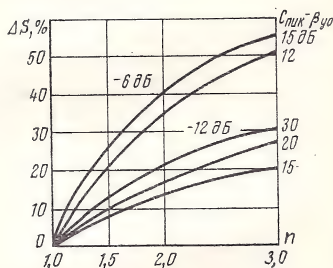


Рис. 8.6. Зависимости снижения слоговой разборчивости ΔS от показателя нелинейности n при порогах ограничения —6 и —12 дБ по отношению к пиковому уровню

ниже порога ограничения обеспечивает бóльшую отдачу в области порога слышимости, а следовательно, большую разборчивость речи. Совсем другая картина будет иметь место, если β_{x0} попадает в область нижнего ограничения. Уровень ощущения речи $E = \beta_р - \beta_{x0}$ будет тем меньше, чем круче амплитудная характеристика и чем ниже порог слышимости, так как при этом все более сильные составляющие речи оказываются ниже порога слышимости. Это с очевидностью следует из рис. 8.5, где даны амплитудные характеристики с разной крутизной ниже порога ограничения. Выше $\beta_{пор}$ характеристика линейна ($n=1$).

На рис. 8.6 приведены результаты расчета зависимости процента снижения слоговой разборчивости от показателя нелинейности n

при порогах ограничения, лежащих на 6 и 12 дБ ниже пикового уровня речи в частотной полосе. Параметром кривых является превышение пикового уровня речи $C_{пик}$ над порогом слышимости β_{y0} на выходе НЗ. Число эффективно передаваемых частотных полос принято $k = 15$. Чтобы сократить число изменяющихся параметров, условно принято, что порог слышимости β_{y0} во всех частотных полосах одинаков.

Примерный порядок расчета следующий. При заданном уровне порога ограничения, например $\beta_{пор}=C_{пик}-12$ дБ, и заданном превышении речи над порогом слышимости, например $C_{пик}-\beta_{y0}=20$ дБ, определяем на оси ординат отрезок $\beta_{пор}-\beta_{y0}=(C_{пик}-\beta_{y0})-(C_{пик}-\beta_{пор})=8$ дБ, а затем через крутизну амплитудной характеристики n находим на оси абсцисс величину

$$\beta_{пор\,x}-\beta_{x\,0}=\frac{\beta_{пор\,y}-\beta_{y\,0}}{n}=4\ дБ,$$

если $n=2$. Выше порога ограничения характеристика линейна, поэтому $\beta_{р.пик}-\beta_{пор\,x}=C_{пик}-\beta_{пор\,y}=12$ дБ. Тогда уровень ощущения пиков речи по входу тракта будет $E=4+12=16$ дБ, а соответствующая этому уровню формантная разборчивость в частотной полосе составит в соответствии с [2] $A=1{,}5$. При числе полос 15 общая разборчивость формант будет равна $\Sigma A=22{,}5\%$, слоговая разборчивость при этом составит $S=52\%$, тогда как в тех же условиях, но при отсутствии нижнего ограничения она равна 66%, т. е. под влиянием нижнего ограничения она снизилась на 14%. Заметим, что при расчетах разборчивости речи, обеспечиваемой нелинейными устройствами, удобнее пользоваться уровнями речи, а не уровнями формант, и зависимостями, связывающими уровни речи непосредственно с формантной разборчивостью, как это делается, например, при измерениях разборчивости тональным методом [9]. Приведенная выше схема расчета может быть несколько изменена, если пользоваться спрямленной амплитудной характеристикой, проведенной между точками C и β_{y0}.

Из кривых рис. 8.6 следует, что снижение разборчивости под влиянием нелинейности амплитудной характеристики ниже порога ограничения может быть значительным, особенно когда порог ограничения высок, а крутизна амплитудной характеристики большая. Так, например, при пороге ограничения —6 дБ по отношению к пиковому уровню речи это снижение даже при небольшой нелинейности $n=1{,}2$ доходит до 10—14%, а при $n=3$ — до 50%. Напомним, что в случае, когда динамическая характеристика аппроксимируется степенным рядом типа (5.1) при большой нелинейности, закон изменения основной составляющей (под основной составляющей здесь подразумевается частотная компонента, поданная на вход и выделенная на выходе, без учета продуктов нелинейности) выражается в предельном случае соотношением $y=x^3$, т. е. в этом случае $n=3$.

Проведенные выше расчеты (рис. 8.6) ярко выражают зависимость разборчивости речи от нелинейности типа нижнего ампли-

тудного ограничения. Однако условия, для которых проведены эти расчеты, несколько преувеличены; такая нелинейность (порог ограничения выше среднего уровня речи) встречается редко, а постоянство величины $C-\beta_{y0}$ может приблизительно иметь место только в трактах высокого качества. Расчеты, проведенные для реальных трактов, дали следующие результаты:

1. Тракт городской телефонной связи, две абонентские линии с затуханием по 6 дБ, соединительная линия с затуханием 35 дБ, крутизна амплитудной характеристики ниже порога ограничения —6 дБ, шум в местах приема и передачи 75 дБ. Тракт без нижнего амплитудного ограничения обеспечивает слоговую разборчивость 57%. При пороге нижнего ограничения с уровнем —6 дБ по отношению к среднему уровню речи разборчивость снизилась до 50%, т. е. на 12,3%, а при пороге ограничения по среднему уровню речи снижение составило 33,4% (с 57 до 38%).

2. Канал ВЧ; абонентская линия длиной 5 км, акустический шум с уровнем 75 дБ, порог ограничения на 6 дБ ниже среднего уровня речи. Слоговая разборчивость при $n=1$ составляет 83%, при $n=2$ — 72%, т. е. снижается.

Норма на нижнее ограничение в ГОСТ на угольные микрофоны [19] задана в виде допустимой величины отклонения. Это отклонение для микрофона с уплотненным угольным порошком не должно превышать 6 дБ при звуковом давлении 0,1 Н/м² по отношению к 1 Н/м². В пересчете на амплитудную характеристику это составит в пределах указанных звуковых давлений крутизну $n=(20+6)/20=1{,}3$. В частном случае в условиях, для которых рассчитаны кривые рис. 8.6, снижение разборчивости речи составит в зависимости от уровня порога слышимости от 5 до 19%. В ГОСТ [21] допустимая величина отклонения амплитудной характеристики от линейности снижена до 1 дБ на участке между 0,1 и 3 Н/м², но относится она к микрофону с разрыхленным угольным порошком. Крутизна амплитудной характеристики составит в этом случае $n=1{,}04$; влияние ее на разборчивость речи будет незначительным.

Рассмотрим далее вопрос о допустимой величине нелинейных искажений типа нижнего амплитудного ограничения. Решение этой задачи сводится к определению допустимой величины уровня порога ограничения по входу тракта. Ее можно определить, задаваясь процентом потери разборчивости [20], а также на основе следующих соображений. Нелинейность амплитудной характеристики не повлияет на разборчивость речи только в том случае, когда все подлежащие передаче речевые составляющие лежат на участке выше порога ограничения, т. е. точка перегиба находится ниже или на уровне порога слышимости, приведенного с выхода тракта на выход или вход нелинейного звена $\beta_{\text{пор}\,x}\leqslant\beta_{x0}$ или $\beta_{\text{пор}\,y}\leqslant\beta_{y0}$.

Задаваясь уровнем ощущения E, соответствующим заданному качеству передачи речи, можно на основании ур-ния (8.1) вычис-

лить уровень порога ограничения

$$\beta_{\text{пор}\,x} \leqslant \beta_{x\,0} = \beta_{\text{р}} - E.$$

Если исходить из равномерного распределения уровня ощущения в частотном диапазоне, то формантная разборчивость составит в частотной полосе $A = A_k/k$, где A — формантная разборчивость, соответствующая заданной слоговой или словесной разборчивости, k — число частотных полос.

Таблица 8.1

Параметр	Число полос	Значение параметра при градации качества			
		предельно допустимом	удовлетворительном	хорошем	отличном
S, %	—	25—40	40—55	55—80	80
ΣA, %	—	8—16	16—24	24—45	45
A_k	10	0,8—1,6	1,6—2,4	2,4—4,5	4,5
	15	0,53—1,06	1,06—1,6	1,6—3,6	3,0
E	10	—0,5—4,5	4,5—10,5	10,5—28	28
	15	—3—1,0	1,0—5,0	5,0—15	15

В табл. 8.1 приведены результаты расчета величин A_k и соответствующих им уровней ощущения речи E для различных градаций качества, а на рис. 8.7 — рассчитанные на основе этих данных частотные характеристики приведенного к входу тракта по-

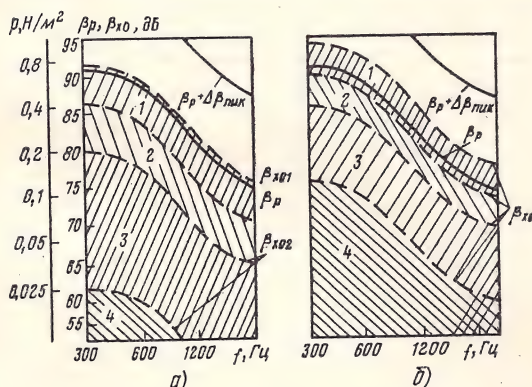


Рис. 8.7. Области разброса величин β_{x0} при градациях качества:

1 — предельно допустимое; *2* — удовлетворительное; *3* — хорошее; *4* — отличное, при передаче 10 и 15 частотных полос

рога слышимости β_{x0}. На рисунке даны области разброса для градаций качества: *1* — предельно допустимого, *2* — удовлетворительного, *3* — хорошего, *4* — отличного. Там же приведены характери-

стики среднего и пикового уровней речи. Из кривых этого рисунка следует, что расчетная величина β_{x0} в рассматриваемом случае (E=const) понижается с увеличением частоты. При этом для достижения, например, хорошего качества связи при полосе эффективно передаваемых частот до 3300 Гц порог ограничения по входу должен быть на частоте 600 Гц не выше 0,35 Н/м², а на частоте 3000 Гц — не выше 0,06 Н/м². Если частотные характеристики до НЗ имеют подъем около 6 дБ на октаву, то $\beta_{пор}=\varphi(f)=$ $=$const. При определении допустимой величины уровня порога ограничения следует также учесть разброс голосов вниз от среднего значения (для 93% голосов он составляет 12 дБ). С этой целью полученные величины звуковых давлений, вычисленные для средних уровней речи, надо уменьшить еще в 3—4 раза. Отсюда следует также, что нижнее ограничение в ряде случаев, особенно при высоком качестве передачи (а также в сетях, где применяется речепреобразующая аппаратура), практически нетерпимо. Однако поскольку оно имеет место в действительности (существующие сети оборудованы в подавляющем большинстве случаев микрофонами старого образца) и, кроме того, является наиболее простым способом подавления помех в паузах речи, ниже будут рассмотрены конкретные случаи его проявления.

8.5. РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ ПРИ ВЕРХНЕМ АМПЛИТУДНОМ ОГРАНИЧЕНИИ

Верхнее амплитудное ограничение или ограничение по максимуму иногда называют просто амплитудным ограничением, хотя это не правомерно, так как нижнее ограничение является также ограничением, но для малых амплитуд. Однако когда речь идет об определенном типе искажения, для краткости в том и другом случае можно применять просто термин «ограничение».

Амплитудное ограничение по максимуму в радиотрактах в сочетании с компенсирующим потерю громкости усилением дает значительное повышение разборчивости и помехоустойчивости (см. гл. 6), так как позволяет поднять уровень слабых составляющих речи до уровня сильных. При этом чем больше ограничение, тем больший динамический диапазон охватывается этим повышением и тем больше выигрыш от ограничения. При предельном ограничении, когда речевые импульсы превращаются в прямоугольные, информация передается переходами через нуль и чем большее число переходов оказывается выше порога слышимости, тем полнее информация, тем выше разборчивость.

Рассмотрим характер зависимости уровня ощущения от глубины ограничения с целью выяснения сущности происходящих при этом процессов и установления математической связи между параметрами амплитудной характеристики и разборчивостью речи. Амплитудные характеристики даже при резком ограничении динамических характеристик выражаются обычно несколько более плавным переходом от линейной части и области ограничения. На

рис. 8.8 для упрощения амплитудные характеристики аппроксимированы двумя прямыми линиями с резким изломом в точке их сопряжения. Кривые *а* и *б* на рис. 8.8 соответствуют ограничению без последующей компенсации снижения уровня, вызванного ограничением. Если порог слышимости β_{x0}, приведенный с выхода тракта к его входу (или входу НЗ), лежит ниже порога ограничения $\beta_{огр}$, верхнее амплитудное ограничение не влияет на уровень ощущения речи, определяемый разностью $\beta_р - \beta_{x0}$ или, если расчет ведется по пиковым уровням, то разностью $(\beta_р + \Delta\beta_{пик}) - \beta_{x0}$. При заданной величине β_{x0} (или, что то же самое, при заданном β_{y0}) все составляющие речи, лежащие выше этого порога слышимости, так же как и при нижнем ограничении, будут услышаны на приемном конце вне зависимости от того, какую форму имеет амплитудная характеристика выше порога ограничения. Речь на выходе тракта в соответствии с кривыми *а* и *б* будет громче или слабее, но вероятность восприятия ее будет одинакова.

По мере снижения β_{x0} (в случае уменьшения помех после НЗ) уровень ощущения, а вместе с ним и разборчивость речи монотонно возрастает, а при повышении порога слышимости монотонно убывает вплоть до того момента, когда порог слышимости достигнет уровня порога ограничения $\beta_{y0} \geqslant \beta_{огр}$. Тогда разборчивость сразу упадет до нуля. Все составляющие речи будут замаскированы шумами, поступающими в тракт после НЗ и определяющими порог слышимости.

Во всей области, где $\beta_{y0} > \beta_{огр}$, уровень ощущения равен нулю, но при снижении β_{y0} хотя бы чуть ниже $\beta_{огр}$ уровень ощущения скачком возрастает на величину $\Delta\beta_{огр}$. При ограничении по среднему уровню речи $\Delta\beta_{огр} = 12$ дБ; это соответствует формантной разборчивости в частотной полосе $A = 0{,}9\%$. При более глубоком ограничении этот скачок будет больше. Так, например, при $\Delta\beta_{огр} = 20$ дБ скачок форматной разборчивости составит $A = 3{,}8\%$.

Если наряду с ограничением применить усиление, то вся амплитудная характеристика сдвинется вверх на величину $\Delta\beta_{ус}$ (пунктирная кривая *в* рис. 8.8). Уровень ощущения $E_{ус}$ при той же величине порога слышимости и той же крутизне характеристики ниже порога ограничения $n = 1$ повысится на величину $\Delta\beta_{ус}$:

$$E_{ус} = \beta_р - \beta_{x0} + (\beta_{x0} - \beta'_{x0}) = E + \Delta\beta_{ус}.$$

Слабые составляющие речи, лежащие на амплитудной характеристике ниже порога слышимости β_{x0}, окажутся в случае применения усиления над порогом слышимости, который сдвинется на величину $\beta_{x0} - \beta'_{x0}$, и могут быть восприняты ухом слушающего на приемном конце. Маскирующее действие шума при том же уровне его (при той же величине β_{y0}) снизится и разборчивость речи возрастет.

Скачок разборчивости речи в точке излома амплитудной характеристики определяется при наличии усиления, так же как и без усиления, глубиной ограничения $\Delta\beta_{огр} = \beta_{р.пик} - \beta_{огр}$ и от величины введенного усиления не зависит. Наличие усиления изменяет

только уровень порога ограничения, при котором происходит скачок. Это следует и из расчетных кривых, приведенных на рис. 8.9, где дана зависимость коэффициента восприятия P от уровня ощущения пиков речи E' на входе ограничителя. Кривые этого рисунка соответствуют: *1* — верхнему ограничению по среднему уров-

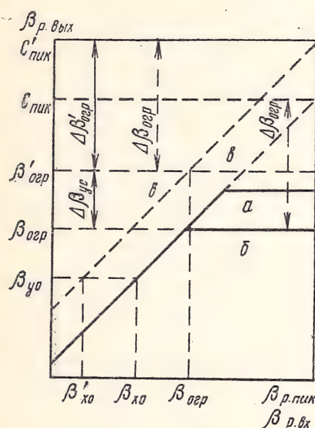


Рис. 8.8. Уровни на выходе при верхнем ограничении с усилением и без усиления в зависимости от порога ограничения по входу

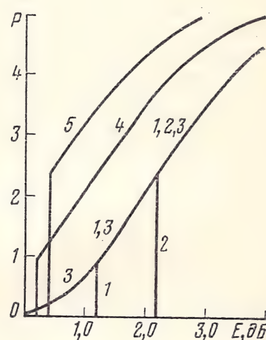


Рис. 8.9. Зависимость коэффициента восприятия P от уровня ощущения речи E по входу ограничителя при разных порогах ограничения

нию речи без усиления; *2* — то же, но ограничение $\beta_{огр} = \beta_{р.ср}$ — 10 дБ; *3*—линейной характеристике без ограничения; *4*—усилению 10 дБ для ограничителя *1;* усилению 18 дБ для ограничителя *2*.

Динамический диапазон при ограничении (рис. 8.8) сокращается сверху на величину $\Delta\beta_{огр} - \Delta\beta_{ус}$, а самые слабые составляющие речи поднимутся до уровня $\beta_{мин} + \Delta\beta_{ус}$. Таким образом, разность максимальных и минимальных уровней будет $\beta_{макс} - (\Delta\beta_{огр} - \Delta\beta_{ус}) - (\beta_{мин} + \Delta\beta_{ус}) = \beta_{макс} - \beta_{мин} - \Delta\beta_{огр}$. Динамический диапазон сократится как и при ограничении без усиления на величину ограничения $\Delta\beta_{огр}$.

В случае, когда на вход ограничителя больших амплитуд подается неискаженная речь, ограничению подвергаются в первую очередь наиболее мощные составляющие, лежащие, как известно, в области нижних частот диапазона, т. е. гласные звуки. Согласные звуки, имеющие меньший уровень (до 20 дБ) в область ограничения могут не попасть. Дополнительное повышение уровня наиболее слабых высокочастотных компонент речевого сигнала можно получить при частотной характеристике (до ограничителя) с подъемом в сторону верхних частот, компенсирующих спад спектра речи, поступающего на ограничитель, что дает дополнительный выигрыш от ограничителя.

Зависимость разборчивости речи от величины тенденции частотных характеристик до ограничения изучалась в ряде работ (см. гл. 7). Установлено, что характеристика с подъемом около 6 дБ/окт близка к оптимальной. Однако для НЧ телефонного тракта опасность переходных разговоров в линии вынуждает к ограничению этой тенденции в области верхних частот разговорного диапазона (см. гл. 2).

В случае применения при ограничении значительного усиления различного рода помехи, поступающие на вход тракта, возрастают иногда до уровня полезного сигнала и заполняют паузы шумом, что снижает эффект от амплитудного ограничения — усиления. К числу таких помех можно отнести дополнительные звуки, сопровождающие речь, но не определяющие разборчивость (неформантные составляющие), а также акустические шумы в помещении передачи и помехи от реверберации. Влияние всех этих помех может быть уменьшено, если одновременно с верхним ограничением применить нижнее ограничение. Величина последнего не должна превышать пределы, допустимые для передачи речи без заметных искажений.

Если ниже порога ограничения $n \neq 1$, то произойдет сдвиг порога слышимости по входу тракта и уровень ощущения будет (см. рис. 8.8)

$$E = \beta_p - \beta_{огр} + \frac{\beta_{огр} - \beta_{y\,0}}{n} = \Delta\,\beta_{огр} + \frac{\beta_{огр} - \beta_{y\,0}}{n}.$$

В случае, когда верхнему ограничению предшествует участок $n<1$, что иногда имеет место в угольных микрофонах (см. приложение 2), особенно в некоторых типах микрофонов американского производства, β_{x0} сместится на рис. 8.8 влево и разборчивость будет выше, чем в случае характеристики с $n=1$ на этом участке. При $n>1$, что также имеет место в угольных микрофонах, главным образом старых типов и преимущественно в области нижних частот, β_{x0} сдвинется вправо и разборчивость снизится.

8.6. КОМПРЕССИЯ

Компрессия динамического диапазона, т. е. сжатие его, решает в конечном итоге ту же задачу, что и ограничение по максимуму, т. е. выравнивает уровни сильных и слабых звуков речи, поднимая последние над уровнем шумов, поступающих в тракт после компрессии. В радиотрактах и различного рода устройствах, связанных с преобразованием речи, компрессия речи обычно сочетается с последующим экспандированием, т. е. с растягиванием амплитудного диапазона, назначением которого является компенсация искажений, внесенных компрессированием, и повышение разборчивости и главным образом качества звучания речи, пострадавшей от компрессии. Вместе эти два преобразования речевого сигнала носят название компандирования. С помощью компрессии амплитудный диапазон речи может быть сжат до

20—25 дБ, а в случае подъема ВЧ составляющих речи, предшествующего компрессии,—до 10—15 дБ.

Влияние компрессии на разборчивость речи проще всего определить путем приведения порога слышимости с выхода тракта на его вход с использованием такого параметра как показатель нелинейности (аналогично сделано выше при рассмотрении ограничителей больших и малых амплитуд).

На рис. 8.10 приведен участок амплитудной характеристики угольного микрофона, крутизна которого меньше единицы (сплошная кривая), что характерно для ряда микрофонов, особенно американского производства. Пунктиром показана линейная амплитудная характеристика с той же отдачей C при среднем уровне речи $\beta_р$. Из графика следует, что приведенный с выхода на вход порог слышимости β_{x0} при том же уровне шума на выходе тракта и соответствующем ему уровне порога слышимости на выходе нелинейного звена β_{y0} при компрессии ниже, чем для линейной системы. Следовательно, уровень ощущения среднего уровня речи над порогом слышимости, определяемый выражением $E=\beta_р-\beta_{x0}$, при компрессии больше; выше и разборчивость речи.

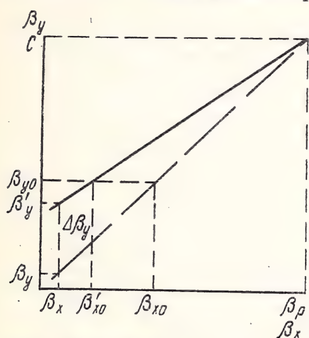


Рис. 8.10. Порог слышимости по входу при компрессии речи для угольного микрофона

Если амплитудная характеристика выше β_{x0} линейна, разности уровней речи и шума на входе и выходе тракта (под заглушкой телефона) для шумов, поступающих в тракт после нелинейного звена, равны между собой: $\beta_{р.з}-\beta_{ш.з}=\beta_р-\beta_{x0}$. При компрессии речи $\beta_{р.з}-\beta_{ш.з}<\beta_р-\beta_{x0}$. Если показатель нелинейности равен n,

$$\beta_{р.з}-\beta_{ш.з}=C-\beta_{y\,0}=n\,(\beta_р-\beta_{x\,0})=n\,E. \tag{8.8}$$

Это значит, что $E=(\beta_{р.з}-\beta_{ш.з})/n$.

Следовательно, уровень ощущения E при $n<1$ возрастает в $1/n$ раз по сравнению с линейной характеристикой. Возрастает и шумозащищенность. Если, предположим, $n=0{,}5$, а $E=20$ дБ, то $\beta_{р.з}-\beta_{ш.з}=0{,}5\cdot 20=10$ дБ вместо 20 дБ при $n=1$, что эквивалентно возможности получить ту же разборчивость при уровне шума, большем на 10 дБ.

Сказанное выше относится к компрессии степенного типа $y=Ax^n$, которая чаще всего имеет место на практике. В случае изменения амплитудной характеристики по другому закону можно воспользоваться спрямленной амплитудной характеристикой, соединив точки $\beta_р$ и β_{x0} прямой линией и таким образом привести характеристику к степенному виду, приняв в качестве показателя нелинейности n крутизну этой прямой.

Величина сжатия динамического диапазона при компрессии представляет собой разность между шириной динамического диапазона на входе и выходе компрессора. Сжатие динамического диапазона при компрессии производится путем подъема слабых составляющих речи и приближения их к уровню сильных при том же уровне максимальных составляющих на входе и выходе компрессора. Используем для иллюстрации этого явления тот же рис. 8.10. Предположим, что $\beta_р$ и C — максимальные уровни речи на входе и выходе устройства соответственно, а β_x и β_y — минимальные уровни ее. Степень сжатия динамического диапазона определится в этом случае отрезком $\Delta\beta_y$, представляющим собой повышение уровня слабых составляющих при компрессии по сравнению с линейной характеристикой. При крутизне амплитудной характеристики n и динамическом диапазоне $D=\beta_р-\beta_x$

$$\Delta\beta_y=(C-\beta_y)-(C-\beta_y')=(\beta_р-\beta_х)-n(\beta_р-\beta_x)=D(1-n).$$

Если, например, $n=0{,}3$, а $D=40$ дБ, динамический диапазон сократится на величину $\Delta\beta_y=28$ дБ и составит на выходе 12 дБ вместо 40 дБ на входе. В случае, если компрессия сопровождается усилением, эти соотношения не изменятся. При попадании на вход компрессора помехи она определит нижнюю границу динамического диапазона как на входе, так и на выходе компрессора. Сжатие динамического диапазона, выраженное отрезком $\Delta\beta_y$, будет равно при этом разности уровней помехи на входе и выходе (исключая усиление). Динамический диапазон сократится на входе по сравнению со случаем отсутствия помехи на величину превышения уровня помехи над уровнем самых слабых составляющих речи, т. е. над нижней границей речевого амплитудного диапазона. В результате этого сжатие динамического диапазона компрессором выразится соотношением

$$\Delta\beta_у=D'(1-n)=[D-(\beta_x-\beta_п)](1-n),$$

где D и D' — динамические диапазоны соответственно при отсутствии и наличии помехи на входе (без учета взаимного влияния речи и помехи); $\beta_п$ — уровень помехи.

Если, предположим, $\beta_п=\beta_x+10$ дБ, динамический диапазон на входе сократится с 40 до 30 дБ, а величина сжатия при $n=0{,}3$ будет $\Delta\beta_y=30\cdot0{,}7=21$ дБ вместо 28 дБ при отсутствии помехи. Если $D=10$ дБ, то $\Delta\beta_y=7$ дБ. Таким образом, наличие помех на входе препятствует эффективной работе компрессора.

Вместе с тем побочные явления, вызванные нелинейностью (подавление слабых звуков шумом при их одновременном прохождении через компрессор, помехи от продуктов нелинейности), отрицательно влияют на разборчивость, что приводит к ее ухудшению при малом отношении сигнал/помеха.

В отличие от верхнего амплитудного ограничения, действующего безынерционно, компрессор обладает инерцией. Возникающие в данном случае устанавливающиеся процессы обусловливают искажения ряда звуков, особенно тех, которые опознаются

ухом по процессам установления переднего и заднего фронтов, таких как звуки б, п, д, т и т. д. Кроме того, схемно компрессор является гораздо более сложным устройством, чем ограничитель по максимуму. Поэтому в ряде случаев амплитудный ограничитель предпочтительнее, особенно в НЧ телефонных трактах, где сжатие динамического диапазона не сопровождается последующим экспандированием.

8.7. ОБ УСЛОВИЯХ, МЕШАЮЩИХ ПРИМЕНЕНИЮ НИЖНЕГО ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ РАЗГОВОРОВ

Вопрос об изыскании эффективных способов подавления в цепях передачи речи различного рода помех за последние годы приобрел особую актуальность в связи с общим повышением требований к качеству связи, расширением областей применения телефонных аппаратов и телефонной связи, появлением громковорящих телефонных аппаратов, появлением речеобразующей аппаратуры и т. д.

Ниже на основе полученных ранее формул, связывающих уровень ощущения с показателем нелинейности (крутизной амплитудной характеристики), выводятся соотношения, позволяющие определить эффект от применения нижнего и верхнего амплитудного ограничения для борьбы с внятными переходами.

В патентной литературе имеются отдельные предложения о применении нижнего ограничения для подавления переходных разговоров, наводимых в каналах связи соседними линиями. Однако, как это будет показано ниже, возможности эффективного использования для этих целей нелинейных устройств с нижним ограничением, являясь заманчивыми по простоте решения, крайне ограниченны.

Переходные разговоры, проникающие к уху слушающего, в какой-то мере маскируются различного рода помехами — акустическими, электрическими и т. д. Акустические шумы могут отсутствовать; переходные разговоры не должны быть внятными при прослушивании их в тишине. Линейные электрические помехи, характерные для линий телефонной связи, в ряде случаев не могут служить надежной гарантией от прослушивания переходных разговоров. Уровень ощущения E переходных разговоров на фоне линейных электрических помех определяется разностью уровней переходной речи и этих помех на выходе линии практически не зависит от свойств оконечного телефонного аппарата (см. гл. 2):

$$E = \beta_{п} - \beta_{э.п.л.} \qquad (8.9)$$

Это соотношение не изменится сколь-либо существенно, если на выходе линии будет включено нелинейное звено с нижним ограничением, так как переходные разговоры и линейная электрическая помеха проходят через НЗ одновременно и поэтому отношение между ними существенно не изменяется. Роль ограничителя

малых амплитуд состоит в том, что он, снижая уровень помехи от переходных разговоров в паузах речи, облегчает маскировку ее шумами, поступающими в тракт после НЗ.

На величину шума, вводимого в тракт, накладываются следующие, порой несовместимые, требования:

переходные разговоры должны маскироваться шумом при максимально возможном уровне их;

шум не должен снижать разборчивость прямой речи при ее минимальном уровне. Это значит, что точка перегиба амплитудной характеристики $\beta_{пор}$ должна лежать на уровне или ниже уровня порога слышимости β_{x0} прямой речи, приведенного с выхода тракта на вход НЗ.

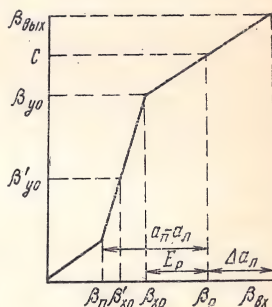


Рис. 8.11. Влияние нижнего ограничения на переходные разговоры

На рис. 8.11 приведена такая характеристика с нижним ограничением в области воздействия переходных разговоров и с $n \leqslant 1$ в области составляющих прямой речи. На основании этого рисунка можно получить простые выражения для определения порога слышимости β'_{x0} переходной речи и уровня ощущения ее $E_п$. Если показатель нелинейности (крутизна амплитудной характеристики) на участке β_{y0}—β'_{y0} (или β_{x0}—β'_{x0}) равен n, то

$$\beta'_{x0} = \beta_{x\,0} - \frac{\beta_{y\,0} - \beta'_{y0}}{n}, \tag{8.10}$$

где $\beta_{x0} = \beta_{пор}$ — уровень порога слышимости для прямой речи, приведенный с выхода тракта на вход НЗ и определяемый ур-нием (8.3); β'_{x0} — то же, для переходных разговоров; β_{y0} и β'_{y0} — уровни порога слышимости прямой и переходной речи, приведенные на выход НЗ:

$$\beta_{y\,0} = \beta_{ш.з} + a, \tag{8.11}$$

$$\beta'_{y0} = \beta'_{ш.з} + a, \tag{8.12}$$

где $\beta_{ш.з}$ и $\beta'_{ш.з}$ — уровни шума, принимаемые в расчет при определении разборчивости прямой речи и переходных разговоров (соответственно); a — сумма затуханий и усилений, включенных в тракт после НЗ.

Из двух последних уровнений следует

$$\beta_{y\,0} - \beta'_{y0} = \beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}. \tag{8.13}$$

Если уровень переходных разговоров на входе НЗ равен $\beta_п$, то уровень ощущения их $E_п$ в условиях, когда форма амплитудной характеристики задана с таким расчетом, что порог нижнего ограничения лежал не выше слабых составляющих прямой речи, т. е. на уровне $\beta_р$—$\Delta\beta_{г.н}$—$E_р$ ($\Delta\beta_{г.н}$ — разброс голосов вниз от

среднестатистического значения $\beta_р$), будет на основании ур-ний (8.10) и (8.13)

$$E = \beta_п - \beta'_{x0} = \beta_п - \beta_р + E_р + \Delta\beta_{г.н} + \frac{\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}}{n}. \qquad (8.14)$$

В этом уравнении уровень прямой речи $\beta_р$ на входе НЗ, если оно включено на выходе линии с затуханием $a_л$, составит

$$\beta_р = \beta_{р.м} + S_{пер} - a_л, \qquad (8.15)$$

а уровень переходного разговора при переходном затухании $a_п$

$$\beta_п = \beta_{р.м} + S_{пер} - a_п. \qquad (8.16)$$

В ур-ниях (8.15) и (8.16) $\beta_{р.м}$ — уровни речи на входе микрофонов, включенных в мешающую и подверженную помехам линии; $S_{пер}$ — коэффициенты передачи телефонных аппаратов на входе этих линий. Разность $\beta_р - \beta_п$ составит при этом

$$\beta_р - \beta_п = a_п - a_л. \qquad (8.17)$$

Тогда выражение (8.14) примет вид (см. ф-лу 24 [6]).

$$E_п = E_{р.г.н} + \frac{\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}}{n} - (a_п - a_л), \qquad (8.18)$$

где $a_п - a_л$ — защищенность тракта.

Уровень ощущения максимальных пиковых значений переходных разговоров, если учесть увеличение этого уровня за счет возможного форсирования речи $\Delta\beta_ф$ на входе мешающего тракта, а также за счет разброса голосов вверх от среднего значения $\Delta\beta_{г.в}$ и пикфактора речи ($\Delta\beta_{пик}$), что в сумме составит $\Delta\beta_{макс} = \Delta\beta_ф + \Delta\beta_{г.в} + \Delta\beta_{пик}$, будет

$$E_{п.пик} = E_р + \frac{\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}}{n} + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\beta_{макс} - (a_п - a_л). \qquad (8.19)$$

Условие полной маскировки переходных разговоров шумом $\beta_{ш.з}$, соответствующей закрытию шумом пиковых величин уровней переходных разговоров, выразится соотношением

$$E_р + \frac{\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}}{n} + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\beta_{макс} - (a_п - a_л) \leqslant 0. \qquad (8.20)$$

Величина $\beta'_{ш.з}$ шума, способного замаскировать пиковые уровни переходных разговоров, связана с уровнем шума $\beta_{ш.з}$, определяющим уровень ощущения прямой речи, следующим уравнением:

$$\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з} \leqslant n\,[(a_п - a_л) - (E_р + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\beta_{макс})]. \qquad (8.21)$$

Уровень шума, способного замаскировать переходные разговоры, составит на выходе НЗ

$$\beta'_{y0} = \beta_{э.п.л} \geqslant \beta_{y0} - n\,[(a_п - a_л) - (E_р + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\beta_{макс})]. \qquad (8.22)$$

На рис. 8.12 приведены результаты расчета по ур-нию (8.19) уровней ощущения максимальных пиковых уровней переходного

разговора при разных значениях защищенности и крутизны, а именно: *1* — при $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з} = 0$ и $n=3$; *2, 3, 4* — при $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з} = 10$ дБ и $n=1$, $n=2$, $n=3$ соответственно; *5, 6, 7* — при $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з} = 20$ дБ и $n=1$, $n=2$, $n=3$ соответственно. При расчетах принято: $\Delta\beta_{ф} = 6$ дБ, $\Delta\beta_{г.в} = 6$ дБ, $\Delta\beta_{пик} = 12$ дБ, $\Delta\beta_{г.н} = 10$ дБ.

На рис. 8.13 (для тех же условий, что и на рис. 8.12) приведены результаты расчета величин $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}$ [см. ур-ние (8.21)], характеризующих минимально необходимую разность между уровнем шума $\beta_{ш.з}$, определяющим заданную разборчивость речи, и уровнем шума $\beta'_{ш.з}$, соответствующим нулевой разборчивости переходного разговора.

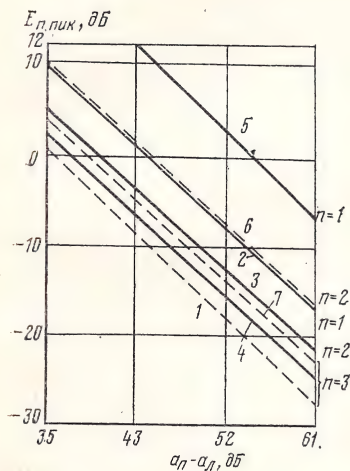


Рис. 8.12. Зависимости уровней ощущения пиковых значений переходных разговоров $E_{п.пик}$ от защищенности при различных показателях нелинейности

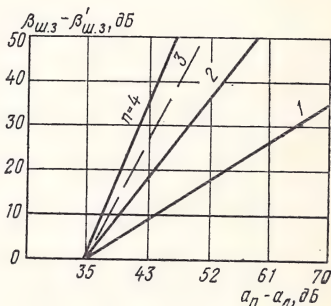


Рис. 8.13. Зависимости разности уровней шумов $\beta_{ш.з}$, определяющих уровень ощущения речи, и шума $\beta'_{ш.з}$, способного замаскировать переходные разговоры, от защищенности ($a_п - a_л$) при разных величинах n

Уравнения (8.21) и (8.22) были получены на основе двух требований: 1) уровень ощущения максимальных пиков помехи $\beta_{п.пик} \leqslant 0$; 2) уровень ощущения речи при заданной величине $\beta_{ш.з}$ соответствует заданному качеству и равен $E_р$. Однако наличие маскирующего шума, создающего на выходе тракта уровень $\beta'_{ш.з}$, может, сложившись с другими помехами, т. е. с $\beta_{ш.з}$, снизить заданную величину $E_р$. Поэтому прежде чем оценить как-то результаты расчета, приводимые на рис. 8.13, рассмотрим, какая разность $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}$ (или $\beta_{у0} - \beta'_э$) допустима без ущерба для передачи речи.

Из графика сложения уровней по интенсивности (см. приложение 2) следует, что уровень бо́льшего шума увеличивается на 1 дБ, если меньший шум имеет уровень на 6 дБ ниже; при разнице 10 дБ уровень бо́льшего шума возрастает несколько меньше, чем на 0,5 дБ. Посмотрим, какое приращение $\beta_{ш.з}$ за счет $\beta'_э$ до-

пустимо. Из графиков, связывающих уровень ощущения речи E с вероятностью восприятия и формантную разборчивость со слоговой разборчивостью [2], следует, что при высоком качестве передачи ($E \geqslant 20$ дБ) допустимо без заметного ущерба для разборчивости речи снижение Е на 1 дБ. При малых уровнях ощущения целесообразнее принять $\Delta E_р = 0{,}5$ дБ, что соответствует $\beta'_э \leqslant \beta_{y0} - 10$ дБ и $\beta'_{ш.з} \leqslant \beta_{ш.з} - 10$ дБ. Таким образом, минимально необходимая разность проходит на рис. 8.13 на уровне 10 дБ.

Разборчивость речи обычно задается в технических условиях для наиболее часто встречающихся уровней помех, а иногда для наиболее тяжелых условий. Когда помехи снижаются, разборчивость возрастает. Чтобы сохранить эту возможность, величину $\beta_{ш.з}$ надо выбирать в целесообразных пределах ниже уровней шумов, заданных ТУ. Таким образом, на величину $\beta'_э$ накладывается столько ограничений, что условия $\Delta E_{п.пик} \leqslant 0$ зачастую нереализуемы.

Нижнее ограничение может быть эффективно использовано для борьбы с внятными переходами только при достаточно высокой защищенности тракта. Например, при защищенности 43 дБ центральное ограничение с $n=3$ согласно рис. 8.13 снижает необходимый уровень маскирующего шума на 14 дБ по сравнению с линейной характеристикой, а при защищенности 52 дБ — на 28 дБ.

Защищенность уменьшается с увеличением частоты, так как затухание линии увеличивается, а переходное затухание уменьшается. Величины защищенности нельзя относить поэтому к номинальным значениям, которые определяются обычно для частоты 800 Гц. При $a_{л\,800} = 39$ дБ и $a_{п\,800} = 61$ дБ защищенность равна порядка 22 дБ и нижнее ограничение неприменимо; оно может дать эффект только при защищенности не ниже 39—43 дБ. Если $a_{л\,800} = 39$ дБ, это соответствует переходному затуханию в области верхних частот диапазона 87 дБ.

8.8. АМПЛИТУДНОЕ ОГРАНИЧЕНИЕ И КОМПРЕССИЯ НА ПЕРЕДАЧЕ КАК ОДИН ИЗ СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ПЕРЕХОДНЫМИ РАЗГОВОРАМИ

Амплитудное ограничение на передаче позволяет снизить максимальные уровни переходных разговоров в линии. Кроме того, наличие предварительного ограничения больших амплитуд расширяет возможности эффективной работы ограничителя малых амплитуд на выходе тракта.

Количественно эффект от амплитудного ограничения может быть определен, если в ур-ния (8.19)—(8.22) вместо $\Delta\beta_{макс}$ подставить величину $\Delta\beta_{огр} = \Delta\beta_{пор.огр} - \beta_р$. Тогда ур-ние (8.21) преобразуется в следующее:

$$\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з} \leqslant n\,[(a_п - a_л) - (E_р + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\,\beta_{огр})]. \qquad (8.23)$$

На рис. 8.14 приведены результаты расчета величин $\beta_{ш.з} - \beta'_{ш.з}$ для двух вариантов амплитудных характеристик аппаратов: *1* —

$\Delta\beta_{огр}=3$ дБ по отношению к среднему уровню речи (соответствует характеристикам аппарата ТА-57); *2*—$\Delta\beta_{огр}=14$ дБ. Из кривых следует, что при малой величине $\Delta\beta_{огр}$ возможности маскировки переходных разговоров шумом улучшаются.

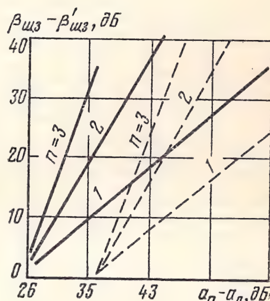


Рис. 8.14. Зависимости разности уровней шумов $\beta_{ш.з}$, определяющих уровень ощущения речи, и шума $\beta'_{ш.з}$, способного замаскировать переходные разговоры, от защищенности ($a_п—a_л$) при $\Delta\beta_{огр}=3$ дБ (сплошные линии) и $\Delta\beta_{огр}=14$ дБ (штрихпунктирные линии)

8.9. ПОДАВЛЕНИЕ РЕЧЕВЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ ГРОМКОГОВОРЯЩИХ ТЕЛЕФОННЫХ АППАРАТОВ (ГТА)

К громкоговорящему устройству могут быть предъявлены требования:

а) оно должно работать как от речи основного абонента, так и от голосов людей, сидящих в комнате;

б) разговор присутствующих людей является помехой и не должен приводить управляющие устройства в действие.

Второе требование является более реальным и целесообразным, так как при этом требуется меньшая чувствительность аппарата, следовательно, может быть обеспечена большая шумостойкость по отношению к акустическим помехам; усиление в ветви передачи будет меньше и затухания, вводимые в управляемые цепи, также меньше, в результате облегчается перебой говорящего и вся работа цепей управления. Кроме того (а это самое главное), в паузах принимаемой речи управляющие устройства под воздействием разговора присутствующих людей могут срабатывать и переключать схемы с приема на передачу. Это может создать путаницу в разговоре и нарушить управление.

Ослабление или полное подавление речевых помех с помощью ограничителя малых амплитуд может происходить только в паузах речи. Уравнения, полученные выше для линейных переходных разговоров, справедливы и для речевых помех, если при этом величину $a_п—a_л$, равную разности уровня речевого сигнала и линейной электрической помехи на входе НЗ, заменить на $a_а+a_ш$, равную разности между уровнем речи и помехи. В самом деле, если мешающий и основной абоненты говорят с одинаковой громкостью и создают на входе НЗ уровни $\beta_{р0}$ и $\beta_{ап}=\beta_{р0}-(a_а+a_ш)$, то их разность составит $\beta_р-\beta_{ап}=a_а+a_ш$, где $a_а$ — акустическое затухание на участке между источником помехи (ртом соседа) и микрофоном телефонного аппарата; $a_ш$—шумозащищенность

микрофона градиента давления (разность уровней от ближнего и удаленного источников).

При такой замене выражения (8.19) и (8.21), примут вид:

$$E'_{\text{а.пик}} = E_{\text{р}} + \Delta\beta_{\text{г.н}} + \Delta\beta_{\text{макс}} + \frac{\beta_{\text{ш.з}} - \beta'_{\text{ш.з}}}{n} - (a_{\text{а}} + a_{\text{ш}}), \quad (8.24)$$

$$\beta_{\text{ш.з}} - \beta'_{\text{ш.з}} \leqslant n\,[(a_{\text{а}} + a_{\text{ш}}) - (E_{\text{р}} + \Delta\beta_{\text{г.н}} + \Delta\beta_{\text{макс}})]. \quad (8.25)$$

Однако для громкоговорящих телефонных аппаратов, управляемых голосом, большее значение имеет отношение сигнал/помеха между начальными звуками речи абонента, которые должны открывать управляющие устройства (на эти звуки обычно рассчитываются пороги срабатывания ГТА), и звуками речевой помехи, которые не должны их открывать. Звуки речи и речевой помехи приходят на вход микрофона ослабленными за счет акустического затухания. При этом акустическое затухание на участке между ртом абонента и микрофоном ГТА отличается от затухания на участке между ртом мешающего соседа и тем же микрофоном.

Акустическое затухание $a_{\text{а}}$ между источником помехи и подверженным помехе микрофоном зависит от расстояния между ними, свойств помещения, коэффициентов направленности и коэффициентов концентрации источника и приемника звука. Расчетные формулы для $a_{\text{а}}$ даны в [10]. Взаимное расположение головы (рта) мешающего абонента по отношению к подверженному помехе микрофону может быть в условиях эксплуатации любым, в том числе и неблагоприятным (затухание направленности $a_{\text{н}}=0$). Кроме того, влияние этого фактора на свободную составляющую звукового поля в обычных служебных помещениях небольшого размера при наличии диффузной составляющей невелико. Поэтому при дальнейших расчетах влияние затухания направленности на величину $a_{\text{а}}$ во внимание не принимается.

В свободном звуковом поле (отраженные звуковые волны отсутствуют) акустическое затухание зависит только от расстояния r между источником помехи (ртом мешающего соседа) и микрофоном. При наличии отраженного звука акустическое затухание уменьшается на величину $\Delta\beta_{\text{д}}$. Последняя также зависит от расстояния r, характеристик помещения (объема, площади отражающих поверхностей, среднего коэффициента поглощения $\alpha_{\text{ср}}$ этих поверхностей), индекса направленности 10Ω, где Ω — коэффициент концентрации источника и приемника звука, т. е. человеческой головы и микрофона. Заметим, что при измерениях акустического затухания помещение должно озвучиваться или естественной человеческой речью, или громкоговорителем, имеющим коэффициент концентрации, близкий по величине к коэффициенту концентрации у человеческого рта (головы) как источника звука. Частотные характеристики $\Omega_{\text{гол}}$ определены в [10]. В случае использования при измерениях ненаправленного микрофона ($\Omega_{\text{м}} = 0$) влияние $\Omega_{\text{м}}$ должно учитываться расчетным путем.

Расчеты по [10] показывают, что в служебной комнате сравнительно небольшого размера акустическое затухание речевых сигналов на расстоянии 100 см от рта при $\Omega_м=3$ составляет около 25—30 дБ. Если микрофон расположен не вблизи рта абонента, а на некотором расстоянии, например 10—20 см, как в случае применения в ГТА настольного микрофона, наиболее пригодного для аппаратов, управляемых голосом, то при расчетах нельзя не учитывать акустическое затухание для прямой речи на участке между ртом абонента и микрофоном. Оно, как показывают расчеты, может составить для небольшой служебной комнаты 8—13 дБ.

От простого нижнего амплитудного ограничения управляющие устройства, применяемые в ГТА, отличаются наличием инерции, а в схемном отношении — наличием вспомогательной цепи управления, через которую входные сигналы воздействуют на запирающие пороговые устройства в речевом тракте. Проанализируем работу этих устройств применительно к схеме с закрытым в паузе усилителем передачи и открытым усилителем приема, являющейся оптимальной в отношении шумозащищенности [10] (рис. 8.15).

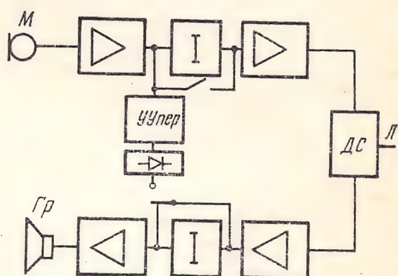


Рис. 8.15 Схема громкоговорящего ТА с управлением голосом на ближнем конце

Наряду с отмеченными выше различиями между речью и акустической речевой помехой (разница в расстояниях до микрофона и характере звукового поля — прямое и диффузное) следует учесть еще одно различие, заключающееся в том, что частотные и амплитудные спектры слабых звуков прямой речи (согласные звуки), которые должны надежно открывать пороговые устройства во избежание потери разборчивости, и звуков помехи (мощные звуки речи, т. е. преимущественно гласные), от которых устройство не должно работать, отличаются друг от друга.

Задачу разделения гласных и согласных звуков можно решить на основе имеющихся статистических характеристик этих звуков. Однако для устройств порогового типа представляет интерес не столько вероятность срабатывания их от звуков речи и речевой помехи вообще, сколько гарантированное срабатывание от конкретных наиболее слабых звуков речи и несрабатывание от самых сильных звуков помехи. Это обусловлено тем, что ложные срабатывания при наличии инерции управляющих цепей на отпускание могут привести к путанице при двухстороннем разговоре. Поэтому дальнейший анализ целесообразно провести для суммарных уровней и спектров отдельных звуков речи, а не для их среднестатистических характеристик.

Для разности $\Delta\beta_{\Sigma пор}$ порогов срабатывания и несрабатывания можно написать уравнение

$$\Delta\beta_{с/п} = \Delta\beta_{\Sigma\,пор} = \sum\nolimits_{(+)}\left(\beta'_{р0} - \Delta\beta_{г.н} + S_{з.у} - a_{а.р} - \right.$$

$$\left. - \sum\nolimits_{(+)}\left(\beta'_{п0} - a_{а.п} - \Delta\beta_{г.в} + \Delta\beta_{ф} + S_{з.у}\right)\right), \qquad (8.26)$$

где $\beta'_{р0}$ и $\beta'_{п0}$ — пиковые уровни звуков прямой речи и помехи у рта абонента или мешающего соседа соответственно, от которых может сработать управляющее устройство; $\Delta\beta_{г.в}$, $\Delta\beta_{г.н}$, $\Delta\beta_{ф}$ — соответственно индексам разброс средних уровней человеческих голосов вверх и вниз от среднестатистического значения и приращение уровня из-за возможного форсирования речи; $S_{з.у}$ — коэффициент передачи звеньев в цепи управления вместе с микрофоном; $a_{а.п}$, $a_{а.р}$ — акустические затухания для помехи и речи.

Переходя далее от уровней и затуханий для отдельных частот к их суммарным величинам во всем частотном диапазоне, получим из (8.26)

$$\Delta\beta_{\Sigma\,с/п} = \left(\sum\nolimits_{(+)}\beta'_{р0} - \sum\nolimits_{(+)}\beta'_{п0}\right) + (a_{\Sigma\,о.п} + a_{\Sigma\,а.р}) +$$

$$+ (S_{\Sigma\,з.\,у.\,р} - S_{\Sigma\,з.\,у.\,п}) + \Delta\beta_{г.в} + \Delta\beta_{г.н} + \Delta\beta_{ф}, \qquad (8.27)$$

где слагаемые определяются по выражениям (для данного звука):

$a_{\Sigma\,а.п}$ — суммарное акустическое затухание для данного звука речевой помехи:

$$a_{\Sigma\,а.п} = \sum\nolimits_{(+)}\beta'_{п0} - \sum\nolimits_{(+)}(\beta'_{п0} - a_{а.п});$$

$a_{\Sigma\,а.р}$ — суммарное акустическое затухание для данного звука речи:

$$a_{\Sigma\,а.р} = \sum\nolimits_{(+)}\beta_{р\,0} - \sum\nolimits_{(+)}(\beta'_{р0} - a_{а.р});$$

$a_{\Sigma\,ш.з.у}$ — суммарная шумозащищенность цепи управления, включая коэффициент передачи микрофона:

$$a_{\Sigma\,ш.з.у} = a_{\Sigma\,з.у.п} - a_{\Sigma\,з.у.р} = S_{\Sigma\,з.у.р} - S_{\Sigma\,з.у.п} =$$

$$= \left[\sum\nolimits_{(+)}(\beta'_{п0} - a_{а.п}) - \sum\nolimits_{(+)}(\beta'_{п0} - a_{а.п} + S_{з.у})\right] -$$

$$- \left[\sum\nolimits_{(+)}(\beta_{р\,0} - a_{а.р}) - \sum\nolimits_{(+)}(\beta_{р\,0} - a_{а.р} + S_{з.у})\right].$$

Все суммарные затухания определяются с учетом деформации спектра звуков после прохождения их через предыдущие звенья цепи.

Для абонентского громкоговорящего телефонного аппарата можно предположить, что управляющие устройства рассчитаны на работу при нормальном уровне, равном примерно среднестатистическому уровню речи без учета разброса голосов вниз от среднего значения, т. е. принять в (8.27) $\Delta\beta_{г.н}=0$. Кроме того, можно предположить, что в обычной служебной обстановке присутствую-

щие во время телефонного разговора будут беседовать между собой несколько приглушенными голосами без всякого формирования (если кто-либо из них не разговаривает по другому телефону при плохой слышимости, что в дальнейшем в расчет приниматься не будет). Тогда $\Delta\beta_{ф}=0$. Примем далее, что для лиц с голосами повышенной громкости снижение громкости при разговоре в комнате составит 6 дБ в сравнении с нормальным для них уровнем речи. Это значит, что $\Delta\beta_{г.в}=0$. Таким образом, в ур-нии (8.27) величины $\Delta\beta_{г.в}+\Delta\beta_{г.н}+\Delta\beta_{ф}=0$.

В качестве примера расчета суммарного акустического затухания приведем расчетные данные для $a_{ш}$ микрофона ДЭМШ-1 [см. (8.24)], применяемого в громкоговорящих телефонных аппаратах АТГС. Частотная характеристика шумозащищенности микротелефона типа ДЭМШ-1 по отношению к удаленному источнику выражается следующими цифрами:

300 Гц	600	900	1200	1400
8,7 дБ	7	6	4,4	3

Суммарная шумозащищенность $a_{\Sigma ш}$ составит при этом для звуков речевой помехи: *а* — 6, *у* — 8, *э* — 8, *и* — 9 дБ. При расчетах использовались спектры звуков русской речи в соответствии с [15, 17].

Микрофон ДЭМШ-1 имеет наименьшую шумозащищенность (6 дБ) по отношению к наиболее мощному, а потому наиболее опасному звуку помехи — звуку *а*. Для других звуков (*у*, *э*, *и*) шумозащищенность несколько выше и составляет, как и для среднестатистического спектра речи, около 8 дБ.

Рассмотрим влияние низкочастотной дискриминации в звене управления на суммарные уровни ряда звуков помехи и прямой речи. Результаты расчета приведены в табл. 8.2. Из нее следует, что как при срезании низкочастотных составляющих, так и при подъеме характеристики на 6 дБ/окт наряду с незначительным улучшением шумозащищенности для согласных звуков по отношению к звукам *а* и *э* имеет место ухудшение шумозащищенности для ряда согласных по отношению к этим звукам. При характеристике с подъемом в сторону верхних частот это ухудшение становится значительным. В [10] показано, что низкочастотная дискриминация в цепи управления дает значительное повышение шумозащищенности по отношению к акустическим помехам (до 10—12 дБ); поэтому отказаться от нее нельзя. В дальнейшем придется считаться с отрицательным влиянием ее при помехе в виде гласных звуков речи.

Для работы управляющих цепей играют роль пиковые величины звуков речи и помехи. Разницу между средними пиковыми и средними фонетическими уровнями отдельных звуков помехи и прямой речи можно вычислить на основании табл. 8.3, где приведены некоторые данные для звуков английской речи [14], сходных по звучанию с аналогичными русскими.

Таблица 8.2

	Звуки	Расчетные величины, дБ				
		$a_{\Sigma з.у}$	$a_{\Sigma п.з.у} - a_{\Sigma р.з.у}$ по отношению к звукам			
			а	и	э	у
	1	2	3	4	5	6
Исключение частот до 600 Гц						
Прямой речи	п	7,0	—5	6	—4	20
	пь	6,0	—3	7	—2	21
	т	0,8	1,2	12,2	2,2	26
	ть	0	2	13	3	27
	д	3,7	1,7	5,3	2,7	23
	дь	2,0	0	11	1	25
	ф	0,3	1,7	12,7	2,7	27
	фь	0	2	13	3	27
	б	8,5	—6,5	4,5	—5,5	18,5
	бь	8,5	—6,5	4,5	—5,5	18,5
	в	21	—19	—8	—18	6
	вь	14,2	—12,2	—1,2	—11,2	13
	к	0	2	13	3	27
	кь	1,1	0,9	11,9	1,9	26
Помехи	а	2	—	—	—	—
	и	13	—	—	—	—
	э	3	—	—	—	—
	у	27	—	—	—	—
Подъем 6 дБ/окт						
Прямой речи	п	8	—5		—9	
	пь	12	—1		—5	
	т	18	5		0	
	ть	13	0		—4	
	д	14	1		—3	
	дь	8	—5		—9	
	ф	16	3		—1	
	фь	16	3		—1	
	б	7	6		—10	
	бь	10,5	—2,5		—6,5	
	в	1	—12		—16	
	вь	3	—10		—14	
	к	16	3		—1	
	кь	19	6		1	
Помехи	а	13	—		—	
	э	17	—		—	

1		2	3	4	5	6
Подъем 12 дБ/окт						
Прямой речи	п	32,5	6,5		—9,5	
	в	11	—15		—31	
	вь	12	—14		—30	
	ф	43	17		1	
Помехи	э	42	—		—	
	а	26	—		—	

Разность $\Delta\beta_{п.пик}$—$\Delta\beta_{р.пик}$ составит на основании этих данных по отношению к звуку *а*: для звука *г*—13 дБ, для *д*—4,9 дБ, для *т*—10 дБ, для *ф*—4 дБ, для *в*—17 дБ.

Таблица 8.3

Параметр, дБ	Звуки речи					Звуки помехи			
	г	д	т	ф	в	о	у	а	э
Средний фонетический уровень	51,8	46	47	46	41,8	70,8	70	72,4	70,4
Средний пиковый уровень	76,9	63	69	61,8	71	83,5	82,5	84,5	84
Разница между средними пиковым и фонетическим уровнями	25,1	17	22	15,8	29,2	12,7	12,5	12,1	13,6

В области пиковых величин мощность пиков пропорциональна их длительности. Однопроцентный пикфактор определяется как разность показаний приборов с постоянной времени 2 и 200 мс [12]. Следовательно, при времени срабатывания 2 мс надо считаться с полной величиной пикфактора звуков. При времени срабатывания 10 мс (близкое к максимальному времени, принятому для ГТА) прибор реагирует на величины пикфактора $N(2)—N(2)\ \frac{10}{200}=0{,}95N(2)$ [10]. Поэтому влияние времени интеграции цепи управления на разность пиковых величин сигнала и помехи можно практически не учитывать и при расчетах брать полную величину разности $\Delta\beta_{р.пик}$—$\Delta\beta_{п.пик}$.

Разультаты расчета отношения сигнал/помеха по ур-нию (8.27) приведены в табл. 8.4. Ограниченные исходные данные позволяют учесть величину этой разницы только для звуков *в, т, ф*.

Все рассмотренные выше и в табл. 8.4 средства воздействия на величину сигнал/помеха не дали результатов, которые обеспечивали бы уверенное срабатывание управляющих цепей от речи

Таблица 8.4

Параметр, дБ	Звуки речи							Звуки помехи
	в	вь	п	пь	ф	б	т	а
Средний фонетический уровень вблизи рта [15, 17]	89	90	86	83	78	85	85	101
Сигнал/помеха по отношению к звуку a при $\Delta\beta_{г.н} = \Delta\beta_{г.в} = \Delta\beta_{к.р} = 0$	—12	—11	—15	—18	—23	—16	—16	—
То же, но на входе микрофона с учетом $a_{\Sigma а.п} - a_{\Sigma а.р} = 12$ дБ	0	—1	—3	—6	—11	—4	—4	—
То же, но с частотной коррекцией (срезание частот ниже 600 Гц)	—19	—11,2	—8	—9	—9,3	—10,5	—2,8	—
То же, но с учетом разницы величин пикфактора	—2,1	—	—	—	—5,6	—	6,2	—

(слабые согласные звуки) и несрабатывание их от помехи (наиболее мощный гласный звук a). В принятых для расчета акустических условиях (небольшая служебная комната с гладкими стенами и канцелярской мебелью) ГТА с управлением голосом работать не смогут. Они должны устанавливаться главным образом в кабинетах, где объем помещения больше, больше мебели, причем мягкой, лучше, если есть ковры и шторы. Присутствующие обычно сидят в таком помещении не вплотную к телефонному аппарату, а на расстоянии 2—3 м и более. В этих условиях диффузная добавка уменьшается, а акустическое затухание возрастает. Увеличение может составить 10—12 дБ и более (см. рис. 2.31, 2.33 в [10]). Тогда может быть обеспечена достаточная защита ГТА от речевых помех в помещении передачи.

На отношение сигнал/помеха оказывают влияние также нестационарные процессы в помещении. Объем книги не позволяет рассмотреть это влияние. Укажем только, что оно выражается в изменении величины диффузной добавки в зависимости от длительности отдельных звуков речи и в изменении фронтов нарастания этих звуков. В [10] показано, что для кратких согласных звуков с длительностью 20—30 мс диффузная составляющая звукового поля за время их звучания не успеет нарасти до стационарного значения и будет ниже его на 6—15 дБ, что позволяет при расстоянии $r \leqslant 1$ м вести расчеты, ориентируясь только на свободную составляющую звукового поля. Более длительные звуки помехи менее подвержены этому влиянию, поэтому снижение акустического затухания под влиянием диффузной добавки для них следует учитывать. Отношение сигнал/помеха при этом ухудшается.

Определим для примера постоянную времени отдельных звуков. Ход кривых нарастания звуков [15] определяется двумя пос-

тоянными времени, $\tau_{зв}$ для кривой нарастания звука и $\tau_ц$ — постоянной времени цепи измерения [16] и выражается уравнением

$$U_2(t) = \frac{U_1}{1 - \tau_{зв}/\tau_ц}\left(e^{-1/\tau_ц} - e^{-1/\tau_{зв}}\right). \qquad (8.28)$$

По кривым рис. 1.17 [16] находим, что для $\tau_{общ}=15$ мс (согласные звуки) и $\tau_ц=$ 4 мс $\tau_ц/\tau_{зв}=0,5$. Следовательно, $\tau_{зв}=6,5$ мс. При $\tau_{общ}=40$ мс $\tau_{зв}=17$ мс (гласные звуки).

Диффузная часть помехи, прежде чем поступить в цепь управления, подвергается воздействию $\tau_{пом}$. Для расчета пригодна та же ф-ла (8.28), если в ней $\tau_ц$ заменить на $\tau_{пом}$. Постоянную времени помещения $\tau_{пом}$ примем равной 34 мс, что соответствует помещению малого объема, неприспособленному в акустическом отношении ($\alpha_{ср}=0,1$). В результате расчета и по графикам рис. 1.17 [16] находим: а) для $\tau_{зв}=6,5$ мс, $U_2=0,78U_1$, $\tau_{зв.пом}=9$ мс; б) для $\tau_{зв}=17$ мс, $U_2=0,96U_1$, $\tau_{зв.пом}=25$ мс.

Таким образом, под воздействием $\tau_{пом}$ фронт звука *a* увеличивается примерно на 40%, при этом изменение уровня сигнала не превышает 2 дБ (в наихудшем случае, когда преобладает отраженная часть звукового поля).

Звуки прямой речи (согласные) имеют более крутые фронты нарастания по сравнению со звуками помехи (гласными). В этом случае уменьшение постоянной времени цепи управления может дать улучшение отношения сигнал/помеха. Рассчитать получаемый при этом эффект невозможно из-за отсутствия сведений о постоянных времени нарастания согласных звуков.

Рассмотрим далее возможность и целесообразность применения в цепи управления верхнего и нижнего амплитудного ограничений, если пороговое устройство отвечает следующим требованиям: срабатывает от звуков речи в отсутствие помехи (наличие помехи при появлении речевого сигнала на входе облегчает открывание закрытых в паузе устройств) и не срабатывает от звуков речевой помехи в паузах речи. Это значит, что порог срабатывания лежит выше уровней помехи и ниже уровней речи и что влияние ограничителя в цепи управления на речь и помеху надо рассматривать в отдельности.

Пусть верхнее ограничение вносится в область амплитуд прямой речи, т. е. выше порога срабатывания $\beta_{пор}$. Это не отразится на срабатывании устройства от слабых звуков речи. Выигрыш от ограничения сводится только к тому, что обеспечивается стабилизация выходного тока усилителя-выпрямителя, который управляет работой ключа, запирающего разговорную цепь в паузе.

Казалось бы, что при совместном прохождении речи и помехи через ограничитель больших амплитуд должно происходить подавление помехи речью. Однако в рассматриваемом случае это явление не имеет места, так как после того как основная ветвь откроется под суммарным воздействием речи и шума, порог ограничения перестает существовать, характеристика разговорного тракта становится линейной, а вспомогательная цепь перестает

действовать на основную. Если наиболее сильные составляющие помехи лежат выше порога срабатывания, то применяя верхнее ограничение, можно снизить помеху до уровня, ниже $\beta_{пор}$, но в этом случае все речевые составляющие, лежавшие выше $\beta_{пор}$, также попадут в область несрабатывания.

Теперь рассмотрим нижнее ограничение. Запирающие устройства, применяемые в ГТА, представляют собой ограничители малых амплитуд (плавного действия или с резкой отсечкой ниже порога ограничения), включаемые в разговорную цепь. Если помеха и сигнал действуют неодновременно, то дополнительное растягивание амплитудного диапазона с помощью ограничителя малых амплитуд может улучшить отношение сигнал/помеха, однако, как показали эксперименты [13], это приводит к значительному снижению разборчивости речи. Влияние шумовых помех на работу громкоговорящих телефонных аппаратов рассмотрено в [10].

Список литературы

1. **Варшавский Л. А.** Доклад на сессии Акустической комиссии Академии наук СССР. Л., 1951.
2. **Покровский Н. Б.** Расчет и измерения разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962. 391 с.
3. **French N., Steinberg J.** Factors governing the Interlligibility of Speech Sounds.—«JASA», 1947, N 1.
4. **Сапожков М. А.** Защита трактов радио- и проводной связи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
5. **Репина О. И.** Пути улучшения характеристик разговорного тракта телефонного аппарата. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1959.
6. **Репина О. И.** Влияние амплитудных характеристик разговорного тракта на разборчивость речи и помехи. — «Электросвязь», 1971, № 11.
7. **Дрейзен И. Г.** Электроакустика и звуковое вещание. М., Связьиздат, 1963.
8. **Ростовцев Ю. Г.** О возможности применения в системе связи предельного амплитудного ограничения речевых сигналов. — «Электросвязь», 1958, № 6.
9. **Гост 8031—56.** Тональный метод измерения разборчивости речи.
10. **Репина О. И.** Громкоговорящая телефонная связь. М., «Связь», 1969. 244 с.
11. **Величкин А. И.** Амплитудное ограничение речи. — «Акустический журнал», 1962, т. VIII, вып. 2.
12. **Основные** нормы и рекомендации МККФ. Дальняя связь. М., Связьиздат, 1948.
13. **Полковский И. М., Ткаченко А. Д.** Электроакустические тракты с обратной связью. М., «Связь», 1969. 224 с.
14. **Fletcher H.** Speech and Hearing, 1929.
15. **Фант Г.** Электроакустическая теория речеобразования. М., «Наука», 1969.
16. **Миленин В. Г., Базь Г. А.** Основы импульсной техники. М., Воениздат, 1966.
17. **Сапожков М. А.** Речевой сигнал в кибернетике и связи. М., Связьиздат, 1963. 450 с.
18. **Катунин Г. П.** Исследование акустических шумов на радиопредприятиях связи. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., МЭИС, 1972.
19. **ГОСТ** 7152—68. Микрофоны угольные общего применения. Методы электроакустических испытаний.
20. **Быков Ю. С.** Теория разборчивости речи в линиях связи. М., Оборонгиз, 1954.
21. **ГОСТ** 7152—74. Микрофоны угольные общего применения. Методы электроакустических испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗЛОЖЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ $y=x^n$ В СТЕПЕННОЙ ПОЛИНОМ

Показатель степени n	Коэффициенты ряда $y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+\ldots$					
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0,1	2,425	—2,3439	1,24397	—0,3957	0,07889	—0,00994
0,2	2,2177	—1,9506	0,97626	—0,2931	0,05484	—0,00643
0,3	1,8526	—1,2347	0,46445	—0,0981	0,01165	—0,00072
0,4	1,8574	—1,3095	0,58411	—0,1560	0,02527	—0,00243
0,5	1,7022	—1,0558	0,4538	—0,1184	0,01883	—0,00178
0,6	1,5464	—0,8048	0,3281	—0,0824	0,01258	—0,00116
0,7	1,3682	—0,5116	0,1725	—0,0347	0,00401	—0,00024
0,8	1,2432	—0,3332	0,1075	—0,0212	0,00241	—0,00014
0,9	1,1102	—0,1321	0,0317	—0,0044	0,00032	—0,000009
1,0	1,0000	0	0	0	0	0
1,1	0,8954	0,1315	—0,0286	0,0039	—0,00027	0,000008
1,2	0,7465	0,3318	—0,0956	0,0191	—0,00225	0,000141
1,3	0,6269	0,4782	—0,1278	0,025	—0,00292	0,000182
1,4	0,5108	0,6135	—0,1508	0,0295	—0,00338	0,000211
1,5	0,3991	0,7359	—0,1638	0,0312	—0,00363	0,000227
1,6	0,2926	0,8441	—0,1663	0,0316	—0,00370	0,000006
1,7	0,3250	0,7425	—0,0547	0,0039	—0,00012	—
1,8	0,1681	0,8965	—0,0691	0,0078	—0,00051	—
1,9	0,0802	0,9574	—0,0401	0,0043	—0,00028	—
2,0	0,0000	1,0000				
2,1	—0,0675	1,0179	0,05346	—0,0053	+0,00034	—
2,2	—0,0675	1,0179	0,0535	—0,0053	+0,00034	—0,000009
2,3	—0,2567	1,0917	0,1499	—0,0079	0,00022	—
2,4	—0,3096	1,0637	0,2273	—0,0109	0,00030	—
2,5	—0,3389	0,9988	0,3202	—0,0137	0,00036	—
2,6	—0,3403	0,8911	0,4288	—0,0157	0,00040	—
2,7	—0,3094	0,7383	0,5531	—0,0164	0,00041	—
2,8	—0,2434	0,5382	0,6917	—0,0148	0,00036	—
2,9	—0,0616	0,1946	0,8835	—0,0178	0,00094	—0,000024
3,0	—0,0000	0,0000	1,000000			

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ УГОЛЬНОГО МИКРОФОНА И МИКРОФОННОЙ ЦЕПИ

П2.1. Угольный микрофон как нелинейное устройство

Действие угольного микрофона основано, как известно, на том, что вследствие колебания звукового давления, воздействующего на мембрану, изменяется сопротивление угольного порошка, что вызывает изменение тока в микрофонной цепи. Сопротивление угольного порошка связано с звуковым давлением (силой), действующей на мембрану, двойной нелинейной зависимостью:

а) нелинейностью соотношения между приложенной силой и смещением мембраны,

б) нелинейностью соотношения между смещением мембраны и сопротивлением угольного порошка.

При работе микрофона в схеме телефонного аппарата добавляется еще нелинейность микрофонной цепи, т. е. нелинейность соотношения между изменением сопротивления микрофона и изменением переменной составляющей тока микрофонной цепи.

П2.2. Статическая жесткость угольного микрофона

Статическая жесткость угольного порошка (вместе с мембраной) может быть определена как отношение величины действующей силы при статическом состоянии порошка (отсутствии колебаний) к величине смещения диафрагмы В угольной ячейке при перемещении мембраны происходит беспорядочное соприкосновение большого числа микроскопических бугорков, расположенных на поверхности угольных зерен. Если предположить, что жесткость угольного порошка пропорциональна числу контактов между его зернами, то, зная закон нарастания числа контактов при перемещении мембраны, можно установить закономерность изменения статической жесткости порошка с изменением приложенной силы.

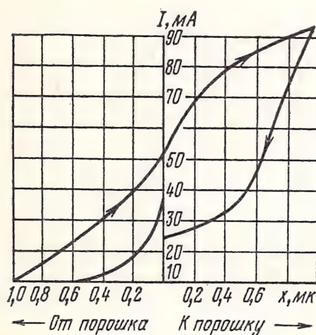


Рис. П.2.1. Зависимость тока микрофона от величины смещения мембраны

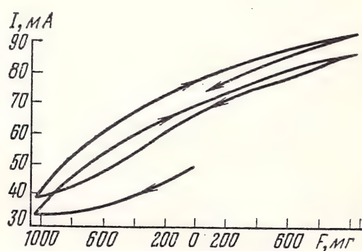


Рис. П.2.2. Зависимость тока микрофона от величины приложенной силы

Для определения статической жесткости угольного порошка были сняты на специальной установке статические характеристики угольной камеры: а) зависимость тока от смещения мембраны (рис. П2.1); б) зависимость тока от приложенной силы (рис. П2.2). Для экспериментов были выбраны микрофон типа МК-10 и один из промежуточных экспериментальных образцов, в которых нелинейные зависимости выражены достаточно ярко.

Жесткость угольного порошка $S=F/x$ определяется для F и x (рис. П2.1 и П2.2), соответствующих одному и тому же значению тока. Результаты расчетов, выполненных по экспериментальным данным А. Д. Архиповой, приведены на рис. П2.3. Зависимость статической жесткости от смещения, т. е. закон нарастания числа контактов, выражается кривой, близкой к интегральной кривой нормального закона распределения. Левый конец кривой соответствует начальному положению мембраны в сторону от порошка, когда замкнута незначительная часть контактов, правая часть — положению мембраны в сторону порошка, когда все контакты уже замкнуты и когда статическая жесткость максимальна, а дальнейшее приращение смещения не дает увеличения жесткости.

Величина статической жесткости при движении мембраны от порошка (пунктирная кривая на рис. П2.3) несколько меньше, чем при движении в сторону порошка, но по характеру изменения кривые сходны между собой. Несовпадение кривых статической жесткости при прямом и обратном ходе мембраны указывает на несостоятельность стремления распространить теорию упругой

деформации единичного угольного контакта Гаучера [1] на всю массу порошка, так как это несовпадение с точки зрения теории упругости должно означать наличие остаточной деформации угольных зерен, что противоречит действительности.

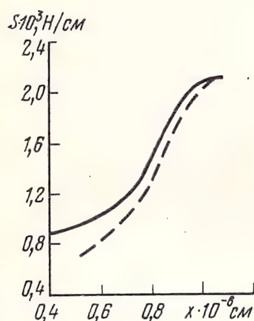


Рис. П2.3. Зависимость статической жесткости порошка от величины смещения мембраны

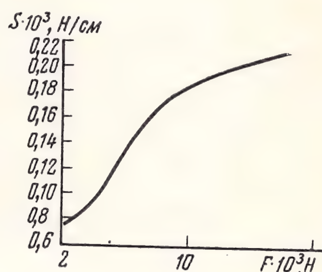


Рис. П.2.4. Зависимость статической жесткости от величины приложенной к мембране силы

На рис. П2.4 приведена зависимость статической жесткости от величины приложенной к мембране силы F: кривая $S\varphi'(F)$ также близко напоминает интегральную кривую вероятности.

П2.3. Динамическая жесткость угольного микрофона

Под динамической жесткостью угольного порошка следует понимать среднюю жесткость за один период. Если мембране сообщить переменное смещение $x=A \sin \omega t$, то величина динамической жесткости и ход ее изменения будут зависеть от величины и формы кривой статической жесткости и от положения рабочей точки на этой кривой.

Положим, что восходящая и нисходящая ветви кривой статической жесткости близки друг к другу. Когда рабочая точка A на рис. П2.5 находится в середине прямолинейного участка кривой статической жесткости, то динамическая жесткость остается примерно постоянной и равной статической жесткости (прямая a на рис. П2.5) до тех пор, пока амплитуда переменного смещения на входе не выйдет за пределы прямолинейного участка.

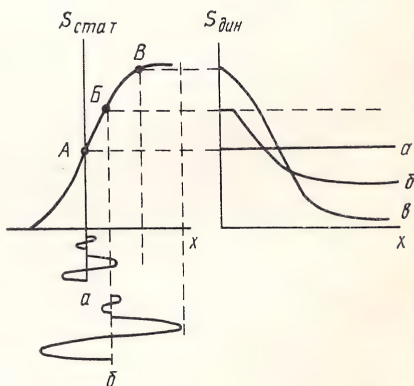


Рис. П2.5. Связь между характеристиками статической и динамической жесткости

Если рабочая точка находится на линейном участке, но несколько выше середины его, что чаще всего и имеет место в микрофонах, то динамическая жесткость в начальной точке будет больше, чем в первом случае; а кривая этой жесткости в пределах линейности кривой статической жесткости для положительной полуволны смещения будет иметь начальный горизонтальный участок (кри-

вая *б* на рис. П2.5), где динамическая жесткость не зависит от амплитуды смещения.

При дальнейшем увеличении амплитуды колебаний, когда положительная полуволна выйдет в область верхнего загиба кривой статической жесткости, а отрицательная полуволна еще останется в пределах линейного участка и будет больше положительной, среднее значение жесткости за каждый период начнет уменьшаться. Это снижение динамической жесткости тем сильнее, чем круче линейный участок кривой статической жесткости, чем резче верхний загиб кривой и чем ближе рабочая точка к этому загибу. При дальнейшем увеличении x, когда амплитуда отрицательной полуволны достигнет нижнего загиба кривой, спад динамической жесткости замедляется и ее значение стремится к постоянной величине.

Когда рабочая точка находится на верхнем нелинейном участке кривой, что имеет место в угольных камерах с плотной засыпкой, или когда порошок «утрясен», динамическая жесткость в начальной точке велика, начальный линейный участок ее отсутствует, спад кривой начинается сразу, а величина жесткости при больших амплитудах меньше, чем в случаях *а* и *б*, так как разница между положительной и отрицательной полуволнами здесь больше.

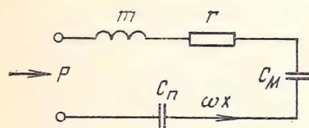


Рис. П2.6. Эквивалентная схема угольной ячейки

Эквивалентная схема угольной ячейки микрофона без предмембранных и замембранных акустических устройств, используемых для выравнивания частотной характеристики, изображена на рис. П2.6, где r — активная составляющая механического сопротивления микрофона; m — приведенная масса мембраны; C — гибкость механической системы микрофона, величина, обратная жесткости S, складывающейся из жесткости мембраны $S_м$ и жесткости угольного порошка $S_п$: $S = S_м + S_п$.

Соотношение между смещением мембраны x и действующей на нее силой F будет для этой схемы

$$\frac{F}{\omega z} = \frac{F}{\sqrt{(S - \omega^2 m)^2 + (\omega r)^2}}. \qquad (П2.1)$$

Известно, что резонансная частота колебательной системы микрофона определяется выражением $f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{m}}$, где S — жесткость; m — масса колебательной системы. Зная резонансную частоту для соответствующего значения звукового давления и массу m, можно определить жесткость колебательной системы $S = \omega_0^2 m$.

При расчетах за величину массы колебательной системы была принята масса мембраны; масса незначительного слоя порошка, прилегающего к мембране, не принималась во внимание. Резонансная частота мембраны определялась «методом песчинки» и оказалась равной 1500 Гц. При $m_м = 0{,}9$ г жесткость мембраны составила $S_м = 8{,}0 \cdot 10^2$ Н.

На рис. П2.7 приведены частотные характеристики микрофона типа МК-10 без акустических выравнивающих устройств, снятые при разных звуковых давлениях. Из анализа кривых следует, что резонансная

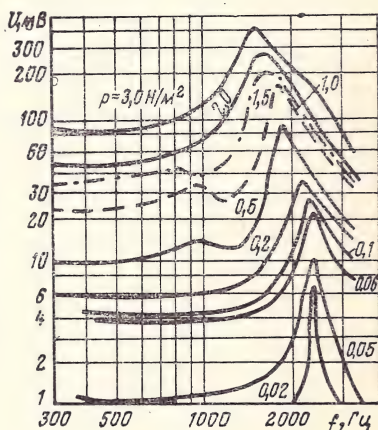


Рис. П2.7. Частотные характеристики угольной ячейки микрофона МК-10

частота с увеличением звукового давления снижается (жесткость уменьшается), а коэффициент резонанса Q уменьшается, на что указывает расширение резонансных кривых.

По рис. П2.7 были определены резонансные частоты, по ним вычислена общая жесткость механической системы, а затем жесткость угольного порошка. Кривая $S_п=\varphi(p)$ приводится из рис. П2.8. Представляет интерес также зависимость напряжения на выходе микрофона от величины смещения x, приведенная на рис. П2.9 и снятая с помощью генератора механических колебаний. Зависимость эта линейна при небольших смещениях мембраны, линейность нарушается при больших x вследствие перемодуляции угольной ячейки.

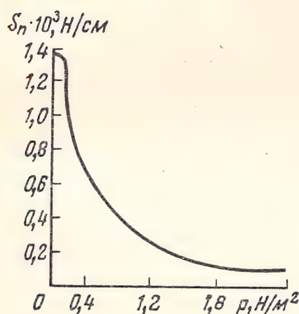


Рис. П2.8. Зависимость динамической жесткости от звукового давления

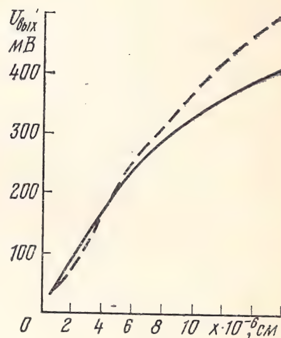


Рис. П2.9. Зависимость напряжения на выходе от смещения мембраны

П2.4. О влиянии кривых жесткости угольного порошка на ход амплитудных характеристик микрофона

Влияние жесткости угольного порошка на амплитудные характеристики особенно четко выявляется на низких частотах, когда $\omega^2 m \ll S$ и $\omega r \ll S$. Тогда ур-ние (П2.1) примет вид $x=F/S$. В этом случае амплитудные характеристики являются как бы зеркальным отражением кривой динамической жесткости механической системы микрофона. Они имеют, как это видно из рис. П2.10, начальный участок, близкий к линейному и соответствующий начальному горизонтальному участку кривой динамической жесткости. Поскольку жесткость здесь велика, чувствительность микрофона мала. Длина этого участка с увеличением частоты сокращается, что объясняется увеличением амплитуды колебаний мембраны по мере приближения частоты к резонансной.

Последующий участок амплитудной характеристики с резким подъемом соответствует резкому спаду динамической жесткости. Надо ожидать, что последующий (третий) участок амплитудной характеристики должен быть близок к линейному и иметь крутизну, равную единице или несколько больше единицы, так как динамическая жесткость здесь снижается, но очень медленно и смещение x практически пропорционально приложенной силе F. Однако крутизна данного участка амплитудной характеристики (частоты 1000, 1100, 1200 Гц) меньше единицы. Это можно предположительно отнести за счет роста активной составляющей r механического сопротивления с увеличением смещения мембраны и асимметрии гибкости гофрированной мембраны. Трение угольного порошка возрастает с увеличением амплитуды и когда (при большой амплитуде) жесткость угольного порошка мала, влияние изменения r становится заметным.

Попытаемся выяснить, насколько справедливо данное предположение. С этой целью, пользуясь кривыми рис. П2.7, определим зависимость коэффициента резонанса Q от величины звукового давления p. Зависимости $Q=\varphi(p)$ и $f_p = =\varphi'(p)$ приведены на рис. П2.11. Пользуясь соотношением $Q=\omega_0 m/r$, определим по рис. П2.11 зависимость $r=\varphi_1(p)$. Приводимая на рис. П2.12 кривая показывает, что потери растут с повышением звукового давления.

Согласно [2] механическая жесткость гофрированной мембраны зависит от типа гофрировки, способа закрепления мембраны, жесткости материала, числа

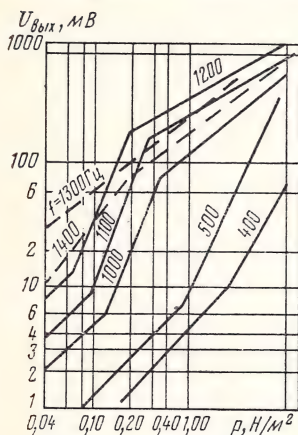


Рис. П2.10. Амплитудные характеристики микрофона МК-10 (с уплотненным порошком) на частотах, ниже основного резонанса

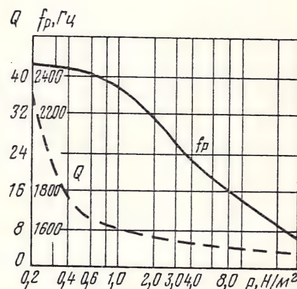


Рис. П2.11. Зависимость коэффициента резонанса Q и резонансной частоты от величины звукового давления

волн, гофрировки, отношения радиуса мембраны к радиусу центральной негофрированной части, от стороны мембраны, с которой приложено давление.

У гофрированной мембраны, в отличие от плоской, величина прогиба зависит от знака приложенного давления. Следовательно, жесткость ее будет различной в зависимости от того, с какой стороны приложено давление. Эта нелинейность тем больше, чем меньше число волн гофрировки и чем больше давление [2].

Если смещение мембраны x вследствие асимметрии ее жесткости несинусоидально, то в случае, когда малая полуволна направлена в сторону сжатия порошка, произойдет уменьшение средней жесткости (по сравнению с синусоидальным смещением), если же в сторону сжатия направлена большая полуволна, то средняя жесткость увеличится; это увеличение тем больше, чем больше смещение. В последнем случае крутизна кривой динамической жесткости, а вместе с ней и амплитудной характеристики, уменьшится.

Из рис. П2.10 следует, кроме того, что граница между вторым и третьим участками амплитудных характеристик, т. е. порог нижнего ограничения по мере роста чувствительности микрофона сдвигается в сторону более низких звуковых давлений. На частотах, близких к основному резонансу (1300, 1400 Гц на рис. П2.10) в связи с этим не выявляется первый, а иногда и второй участок амплитудной характеристики.

На частотах, лежащих выше резонансной частоты мембраны, как это видно из характеристик рис. П2.13, где $\omega^2 m > S$, влияние жесткости сказывается только там, где чувствительность микрофона низка, т. е. в области провала частотной характеристики (частоты 1600, 2200 Гц). Здесь амплитудные характеристики в области, доступной при экспериментальных условиях, имеют только второй

участок с большой крутизной, который почти сразу переходит в область верхнего загиба.

На частотах, где $\omega^2 m \gg S$, ур-ние (П2.1) принимает вид $x = F/\omega^2 m$. Амплитудные характеристики в этом случае линейны (частоты 2500 и 3000 Гц на рис. П2.13).

Верхний загиб амплитудной характеристики обусловлен тем, что при больших амплитудах колебания мембраны происходит отрыв зерен порошка друг от

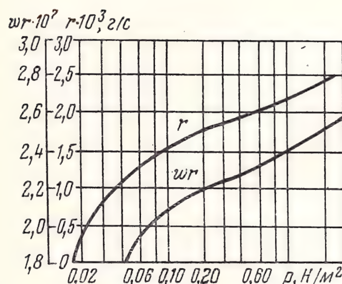


Рис. П2.12. Зависимость активной составляющей механического сопротивления от величины звукового давления

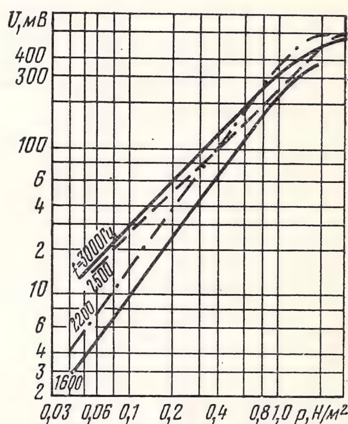


Рис. П2.13. Амплитудные характеристики угольного микрофона МК-10 на верхних частотах диапазона

друга («растряска» порошка), вследствие чего сопротивление микрофона возрастает, а переменная составляющая тока падает. Определенную роль здесь может также играть перемодуляция угольной ячейки.

П2.5. Влияние утряски на жесткость порошка и на амплитудные характеристики микрофона

Утряска порошка является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на характер изменения величины статической и динамической жесткостей порошка, а следовательно, и на ход амплитудных характеристик микрофона. В результате утряски происходит изменение расположения зерен, порошок уплотняется, общее число доступных замыканию контактов возрастает, в результате общая жесткость увеличивается, интегральная кривая вероятности замыкания контактов становится более пологой, а статическая жесткость возрастает. Общий ход кривых статической и динамической жесткости для утрясенного и неутрясенного порошка можно представить кривыми рис. П2.14, построенными на основе анализа приводимых ниже характеристик.

Изменение динамической жесткости микрофона МК-10 в зависимости от утряски показано на рис. П2.15 (динамическая жесткость определялась по резонансной частоте). Динамическая жесткость утрясенного порошка больше, чем неутрясенного, что объясняется прежде всего тем, что статическая жесткость его больше. Кривые динамической жесткости утрясенного порошка имеют своеобразную форму. После небольшого почти горизонтального участка наблюдается участок резкого спада (кривая *2* на рис. П2.15). Затем следует довольно большой участок, где жесткость постоянна, а затем снова происходит спад, но уже медленный, и кривая приближается к какому-то постоянному значению (см. также рис. П2.14). При утрясенном порошке кривая статической жесткости идет кру-

че, поэтому кривая динамической жесткости спадает быстрее и достигает постоянства при малых амплитудах смещения.

Приведенным на рис. П2.15 кривым в основном соответствуют экспериментальные амплитудные характеристики рис. П2.16. Верхняя линейная характеристика соответствует неутрясенному порошку. Нелинейность повышается с увеличением звукового давления и времени утряски (0,5 Н/м², 10 с; 3 Н/м², 10 с; 3 Н/м², 30 с; 3 Н/м², 1 мин).

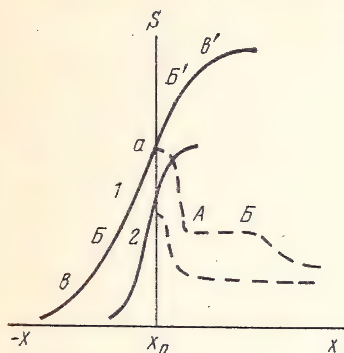


Рис. П2.14. Общий ход кривых статической и динамической жесткостей для микрофона с утрясенным и неутрясенным порошком

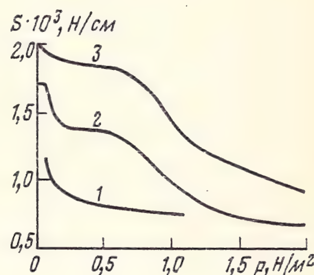


Рис. П2.15. Изменение динамической жесткости угольного микрофона МК-10 под влиянием утряски:

1 — без утряски; *2*, *3* — утряска тоном 1 и 3 Н/м² соответственно

Утряска порошка перед измерениями характеристик угольных микрофонов была предусмотрена в ГОСТ [3] с целью стабилизации параметров угольного микрофона. В ГОСТ [4], наоборот, предусмотрена растряска угольного порошка путем поворота микрофона вокруг горизонтальной оси перед каждым отсчетом. Такая методика наряду с существенным уменьшением нелинейности характеристики микрофона позволила значительно улучшить ход амплитудных характеристик и повысить требования к их линейности (например, микрофона МК-16).

В процессе эксплуатации порошок под действием речи уплотняется, а при движениях абонента, особенно резких, и укладке микротелефонной трубки на рычаг аппарата происходит его разрыхление.

Разрыхления может и не происходить в тех случаях, когда абонент разговаривает, держа микротелефонную трубку неподвижно, например если он облокотился на стол. Опыты показали, что существенной разницы между способами утряски (чистым тоном, речевым спектром, естественной речью) нет. Основную роль играет продолжительность утряски и величина звукового давления. Старые типы микрофонов, например МК-10, с большими угольными камерами, плоскопараллельными электродами и с большой засыпкой особенно склонны к утряске. Снижение способности микрофона к уплотнению порошка является одной из главных задач в борьбе с нелинейностью.

В микрофоне МК-16 применена угольная камера малого размера усложненной конфигурации, засыпанная малой порцией мелкозернистого угольного порошка, что наряду со значительным улучшением амплитудных характеристик несколько снизило способность этого микрофона к утряске порошка, однако не ликвидировало эту опасность целиком, о чем свидетельствуют кривые на рис. П2.17. Здесь приведены амплитудная характеристика для разрыхленного порошка (сплошная кривая) и характеристика, снятая после громкого разговора перед микрофоном в течение 30 с (пунктирная кривая). При этом микрофон

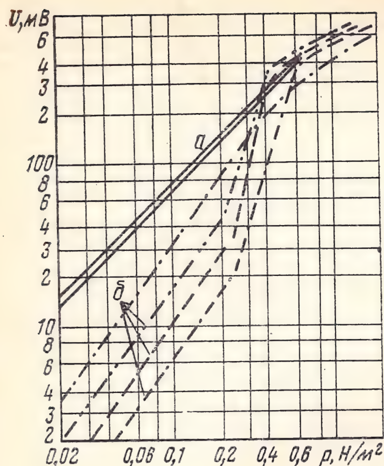


Рис. П2.16. Амплитудные характеристики микрофона МК-10 на частоте 2250 Гц при различном звуковом давлении и продолжительности утряски:

а) порошок не утрясен; б) уплотняющее звуковое давление и время утряски соответственно: 0,5 Н/м² и 10с; 3 Н/м² и 10с; 3 Н/м² и 30с; 3 Н/м² и 60с

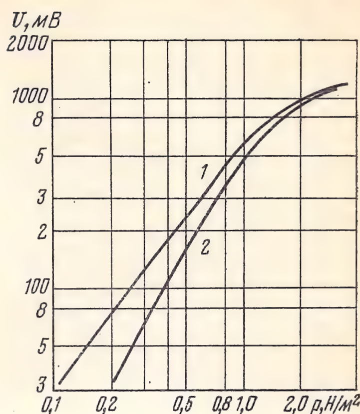


Рис. П2.17. Амплитудные характеристики микрофона МК-16, снятые с предварительной растряской (кривая *1*) и утряской (кривая *2*) угольного порошка

держали в руке, а затем осторожно, не встряхивая порошок, подносили к искусственному голосу.

Склонность угольного микрофона к утряске в зависимости от степени заполнения угольной камеры порошком и времени утряски изучалась в работе [14]. Полученные результаты в значительной мере совпадают с изложенными выше материалами.

П2.6. О параметрах угольной ячейки, определяющих ход кривых жесткости и амплитудных характеристик

Выше говорилось, что кривая статической жесткости по своему характеру напоминает интегральную кривую, выражающую нормальной закон распределения вероятностей. Кривая зависимости процентного числа замкнутых контактов N от величины смещения мембраны α, вычисленная по теории вероятности, имеет вид, изображенный на рис. П2.18 (кривая *1*). Участок кривой BC есть интеграл вероятности Гаусса с пределами от 0 до $+\infty$, а участок AB — интеграл вероятности с пределами от $-\infty$ до 0. В отличие от обычного интеграла данный интеграл имеет положительную и отрицательную ветви.

На том же рисунке нанесена кривая статической жесткости угольного порошка в зависимости от величины смещения мембраны x, полученная экспериментальным путем (кривая *2*). Кривые совпали совершенно точно, хотя для наглядности они проведены на некотором незначительном расстоянии друг от друга. Это облегчает анализ явлений в угольной камере, так как позволяет использовать для этих целей хорошо разработанный математический аппарат теории вероятностей. С ее помощью может быть установлена связь между средней дисперсией, определяющей ход кривых статической жесткости, и такими параметрами угольной ячейки, как диаметр электродов, расстояние между ни-

ми, высота засыпки порошка, общее число зерен в камере, их диаметр [7]. При этом приходится считаться с такими факторами, как опасность обгорания зерен угольного порошка и увеличение собственных шумов микрофона в случае уменьшения числа зерен и межэлектродного расстояния.

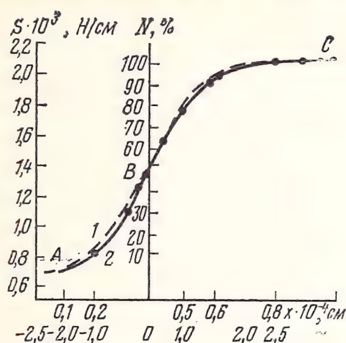


Рис. П2.18. Вычисленная (*1*) и экспериментальная (*2*) кривые статической жесткости

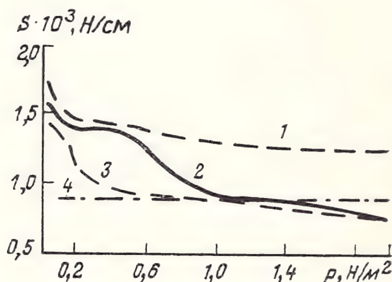


Рис. П2.19. Зависимости динамической жесткости механической системы различных микрофонных капсюлей от величины звукового давления:

1 — микрофон с большой угольной камерой и плотной засыпкой; *2* — микрофон с большой угольной камерой и слабой засыпкой; *3* — микрофон с камерой средних размеров и плотной засыпкой; *4* — микрофон с камерой малых размеров и плотной засыпкой

Полученные теоретические соотношения в основном подтверждены экспериментально. Одна из наиболее характерных экспериментальных кривых приведена на рис. П2.19. Кроме того, экспериментально установлено наличие зависимости жесткости от технологии обработки (температуры обжига) угольного порошка.

П2.7. Частотные характеристики угольного микрофона

В соответствии с установившейся методикой [4] частотные характеристики угольного микрофона измеряются при звуковом давлении 1,0 Н/м². Эти характеристики являются обычно базой для расчетов разборчивости речи; по ним задается неравномерность частотных характеристик. На рис. П2.20 приведено семейство частотных характеристик микрофона МК-10, снятых при разных звуковых давлениях (с предварительной утряской речью), а на рис. П2.21 — то же, для микрофона МК-16. При низких звуковых давлениях частотные характеристики имеют очень узкую полосу пропускания с резко выраженными пиками, особенно для микрофона МК-10. У микрофона МК-16 увеличение пикообразности с уменьшением звукового давления выражено не столь резко, хотя и имеет место.

Таким образом, полоса пропускания, определяемая при звуковом давлении 1 Н/м², что соответствует примерно среднему уровню гласных звуков, характеризует микрофон только при этом давлении. При более низких звуковых давлениях, соответствующих уровням согласных звуков, полоса пропускания сужается, хотя для этих звуков, наиболее богатых по сравнению с гласными высокочастотными формантными составляющими, требуется более широкая полоса пропускания. Наоборот, в области пиковых значений звуковых давлений речи, не играющих для разборчивости речи существенной роли, полоса пропускания расширяется, а неравномерность уменьшается. Такие изменения частотных ха-

рактеристик в зависимости от величины звукового давления объясняются повышением жесткости порошка при малых амплитудах воздействия и тем, что коэффициент резонанса зависит от жесткости механической системы микрофона, а потому сам связан с силой, действующей на мембрану.

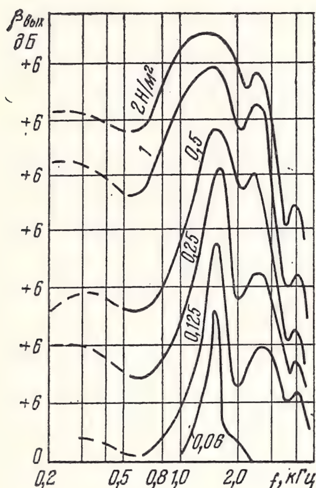


Рис. П2.20. Частотные характеристики микрофона МК-10 при разных звуковых давлениях

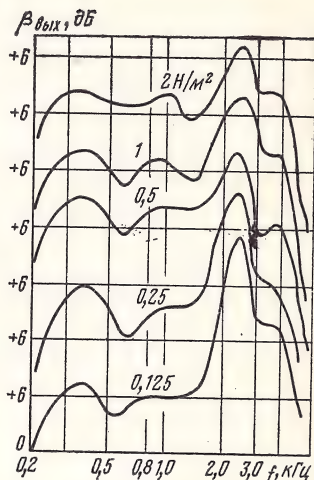


Рис. П2.21. Частотные характеристики микрофона МК-16, снятые при разных звуковых давлениях

На рис. П2.22 приведены частотные характеристики, снятые не при постоянном звуковом давлении, а при давлениях, соответствующих среднему статистическому уровню речи в каждой полосе частот. В ряде случаев такие характеристики удобнее для оценки как отдачи микрофона, так и неравномерности его

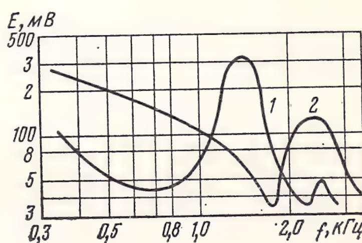


Рис. П2.22. Частотные характеристики, снятые при давлениях, соответствующих среднестатическим уровням речи в частотных полосах:
1 — МК-10; *2* — МК-16

характеристики, так как при этом учитывается влияние нелинейности, выражающейся в снижении чувствительности с уменьшением действующего на микрофон звукового давления.

П2.8. Нелинейные искажения микрофонной цепи

Выше показано, что при подаче на вход микрофона звукового давления, изменяющегося синусоидально, сопротивление микрофона изменяется несинусоидально, но, если бы оно подчинялось закону синуса, переменный ток в цепи

микрофона в общем случае не был бы синусоидальным. Рассмотрим нелинейные искажения на примере простейшей электрической цепи, состоящей из источника питания и соединенных последовательно сопротивлений микрофона и нагрузки, подключенных к этому источнику.

Пусть сопротивление микрофона изменяется по закону $r\cos\omega t$, где r — амплитуда переменной составляющей сопротивления микрофона. Тогда ток в микрофонной цепи при омической нагрузке определится выражением $i = E/(R - r\cos\omega t)$, где $R = R_н + R_м$. Разложение его в ряд дает уравнение для тока в микрофонной цепи:

$$i = \mathcal{I}_0 + \mathcal{I}_1\cos\omega t + \mathcal{I}_2\cos 2\omega t + \ldots + \mathcal{I}_k\cos k\omega t.$$

На основе теории рядов Фурье могут быть получены следующие выражения для составляющих тока [21, 22]:

$$\mathcal{I}_0 = \frac{E}{\sqrt{R^2 - r^2}}, \quad \mathcal{I}_k = 2\mathcal{I}_0\left(\frac{R - \sqrt{R^2 - r^2}}{r}\right)^k.$$

Выражения эти могут быть преобразованы путем деления числителя и знаменателя на R. Тогда, обозначая $r/R = \lambda$, получим следующие выражения для составляющих тока:

$$\mathcal{I}_0 = \frac{E}{R\sqrt{1-\lambda^2}}, \mathcal{I}_k = \frac{2E}{R\sqrt{1-\lambda^2}}\left(\frac{1-\sqrt{1-\lambda^2}}{\lambda}\right)^k =$$

$$= 2\,\mathcal{I}_0 d^k = \mathcal{I}_{k-1} d.$$

Здесь λ — глубина модуляции микротелефонной цепи, связанная с глубиной модуляции сопротивления микрофона соотношением

$$\lambda = \frac{\lambda_м}{1 + R_н/R_м}.$$

Коэффициент нелинейных искажений от K-й гармоники будет при этом

$$K = \left(\frac{1-\sqrt{1-\lambda^2}}{\lambda}\right)^{k-1}\cdot 100\% = d^{k-1}\cdot 100\%.$$

Расчеты показывают, что при $R_н = R_м$, что соответствует $\lambda = \lambda_м/2$, зависимость коэффициента нелинейных искажений микрофонной цепи от глубины модуляции сопротивления микрофона может быть выражена цифрами, приведенными в табл. П2.1. Там же приведена зависимость от $\lambda_м$ величины $J_0 = E/R$. Нижняя строка таблицы характеризует основную составляющую тока микрофонной цепи, совпадающую по частоте с изменением амплитуды переменного сопротивления микрофона.

Таблица П2.1

Глубина модуляции микрофона $\lambda_м$	Отношение токов, %			
	$\mathcal{I}_{2\omega}/I_1$	$\mathcal{I}_{3\omega}/I_1$	$\mathcal{I}_0/I_0$	$\mathcal{I}_1/I_0$
0,2	5	0,25	1,01	0,101
0,4	10	1,0	1,02	0,204
0,5	12,8	1,64	1,03	0,264
0,8	21	4,4	1,09	0,458
1,0	26,8	7,4	1,153	0,616

Данные таблицы позволяют сделать следующие выводы:

1. В результате нелинейных искажений в цепи микрофона появляются гармоники, величины которых растут по мере повышения коэффициента модуляции микрофона.

2. Наибольшую величину имеет гармоника с частотой 2ω. Это указывает на асимметрию выходного колебания относительно оси абсцисс (асимметрия между полуволнами). Вторая гармоника увеличивается практически почти пропорционально величине $\lambda_м$, достигая при $\lambda_м=1$ значения 26,8%.

3. Третья гармоника с частотой 3ω значительно меньше второй, при малых $\lambda_м$ в 20—10 раз, с увеличением $\lambda_м$ она быстро растет и при $\lambda_м=1$ достигает 7,4%. Гармоники более высоких порядков составляют доли процента.

4. Постоянная составляющая тока с увеличением $\lambda_м$ растет, но незначительно. В пределах до $\lambda_м=0{,}5$ она превышает величину ER на 1—3%, при $\lambda_м=1$ это превышение достигает 15,3%.

5. Основная составляющая тока в пределах до $\lambda_м \approx 0{,}5$ растет примерно пропорционально величине $\lambda_м$, дальше рост ее убыстряется, возникают искажения типа нижнего ограничения, сводящиеся однако к непропорциональному увеличению тока только в области больших амплитуд, не превышающему к тому же 2 дБ при $\lambda_м=1$. Такое отклонение от линейности не окажет никакого влияния на разборчивость речи.

Расчеты показывают, что с увеличением сопротивления нагрузки по сравнению с сопротивлением микрофона при той же глубине модуляции микрофона глубина модуляции микрофонной цепи в целом уменьшается, следовательно, уменьшаются и искажения. Так, например, при $R_н=10$; $R_м\lambda=\lambda_м/1{,}1$; при $\lambda_м=1$ величина λ будет равна 0,09, а искажения практически близки к нулю. Наоборот, с уменьшением нагрузки искажения растут. При $R_н=0{,}1\ R_м$ и $\lambda=\lambda_м/1{,}1=0{,}908\ \lambda_м$ искажения основной составляющей при $\lambda_м=1$ составят 13 дБ по сравнению с линейной характеристикой, а коэффициент нелинейных искажений от гармоники с частотой 2ω достигнет 64%.

Микрофонные цепи телефонных аппаратов имеют в большинстве случаев комплексную нагрузку. Уравнение для микрофонной цепи с индуктивной нагрузкой имеет вид

$$L\frac{di}{dt}+(R+r\sin\omega t)=E.$$

Это уравнение для установившегося процесса может быть представлено в виде ряда

$$i=\mathcal{I}_0+\sum_{k=1}^{\infty}\mathcal{I}_{ks}\sin kx+\sum_{k=1}^{\infty}\mathcal{I}_{kc}\cos kx.$$

Решения этого уравнения для микрофонной цепи даны Яковлевым [21] и Цыпкиным [22]. Яковлев приводит выражения для составляющих тока цепи в виде гамма-функций:

$$\mathcal{I}_0=\frac{E}{R}M_0(r);\quad M_0(r)=1+\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(2k-1)!}{2k!}\,\frac{r^{2k}}{(Z_1Z_2\ldots Z_k)^2};$$

$$\mathcal{I}_{1s}=\frac{2E}{R}M_1(r);\quad M_1(r)=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k\,(2k-1)!}{2k!}\,\frac{r^{2k}}{(Z_1Z_2\ldots Z_k)^2};$$

$$\mathcal{I}_{1c}=\frac{2E}{R}M_2(r);\quad M_2(r)=M_0(r)-1;$$

$$\mathcal{I}_{ks}=\frac{2}{r}\left[-(k-1)\,\omega L\mathcal{I}_{(k-1)c}+R\mathcal{I}_{(k-1)s}-\frac{1}{2}r\mathcal{I}_{(k-2)s}\right];$$

$$\mathcal{I}_{kc}=\frac{2}{r}\left[(k-1)\,\omega L\mathcal{I}_{(k-1)c}+R\mathcal{I}_{(k-1)s}-\frac{1}{2}r\mathcal{I}_{(k-2)s}\right],$$

где Z — модуль сопротивления микротелефонной цепи.

Подставляя в эти уравнения коэффициент k и полагая $I_0 = E/R$, получим

$$\frac{\mathcal{I}_0}{I_0} = 1 + \frac{1}{2}\frac{r^2}{Z_1^2} + \frac{3\,r^4}{8\,Z_1^2\,Z_2^2} + \frac{5\,r^6}{16\,Z_1^2\ldots Z_3^2} + \frac{35\,r^8}{108\,Z_1^2\ldots\,Z_4^2}\;;$$

$$\frac{\mathcal{I}_{1c}}{I_0} = \frac{2R}{r}\left(\frac{r^2}{Z_1^2} + \frac{3\,r^4}{4\,Z_1^2\,Z_2^2} + \frac{5\,r^6}{8\,Z_1^2\ldots Z_3^2}\right);$$

$$\frac{\mathcal{I}_{1s}}{I_0} = \frac{2\,\omega L}{R}\left(1 + \frac{3r^2}{2\,Z_1^2} + \frac{15\,r^4}{8\,Z_1^2\,Z_2^2} + \frac{35\,r^6}{16\,Z_1^2\ldots\,Z_3^2} \pm \frac{312\,r^8}{128\,Z_1^2\ldots\,Z_4^2}\right.\cdot$$

Эти уравнения целесообразно несколько преобразовать и ввести величины, характерные для микрофонной цепи: $\lambda = r/R$ и $a = R/\omega L$, где a — декремент затухания, λ — глубина модуляции. В результате получим

$$\frac{\mathcal{I}_0}{I_0} = 1 + \frac{1\,\lambda^2\,a^2}{2\,a^2+1} + \frac{3\,\lambda^4\,a^4}{8\,(a^2+1)\,(a^2+4)} + \frac{5\,\lambda^6\,a^6}{16\,(a^2+1)\,(a^2+4)\,(a^2+9)} +$$

$$+ \frac{35\,\lambda^8\,a^8}{108\,(a^2+1)\ldots(a^2+16)}\;;$$

$$\frac{\mathcal{I}_{1c}}{I_0} = a^2\lambda\left(\frac{1}{a^2+1} + \frac{3\,\lambda^2\,a^2}{4\,(a^2+1)\,(a^2+4)} + \right.$$

$$\left. + \frac{5\,\lambda^4\,a^4}{8\,(a^2+1)\,(a^2+4)\,(a^2+9)} + \ldots\right);$$

$$\frac{\mathcal{I}_{1s}}{I_0} = a\lambda\left(\frac{1}{a^2+1} + \frac{3\,\lambda^2\,a^2}{2\,(a^2+1)\,(a^2+4)} + \frac{15\,\lambda^4\,a^4}{8\,(a^2+1)\,(a^2+4)\,(a^2+9)} + \right.$$

$$+ \frac{35\,\lambda^6\,a^6}{16\,(a^2+1)\ldots(a^2+16)}\;;$$

$$\mathcal{I}_{2c} = 2\left(\frac{\mathcal{I}_{1s}}{a\lambda} + \frac{\mathcal{I}_{1c}}{\lambda} - \mathcal{I}_0\right); \quad \mathcal{I}_{2s} = \frac{2}{\lambda}\left(\frac{\mathcal{I}_{1c}}{a} + \mathcal{I}_{1s}\right);$$

$$\mathcal{I}_{3c} = \frac{4}{a\lambda}\,\mathcal{I}_{2s} + \frac{2}{\lambda}\,\mathcal{I}_{2c} - \mathcal{I}_{1c};$$

$$\mathcal{I}_{3s} = -\frac{4}{a\lambda}\,\mathcal{I}_{2c} + \frac{2}{\lambda}\,\mathcal{I}_{2s} - \mathcal{I}_{1s}; \; \mathcal{I}_k = \sqrt{\mathcal{I}_{ks}^2 + \mathcal{I}_{kc}^2}\;;$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\mathcal{I}_{ks}}{\mathcal{I}_{kc}}.$$

Рассмотрим, как влияют нелинейные искажения микрофонной цепи на основную составляющую тока $\mathcal{I}_1$. Результаты расчета зависимости $\mathcal{I}_1/I_0$ от λ приведены на рис. П2.23. Из кривых видно, что нелинейные искажения увеличиваются с ростом глубины модуляции λ и декремента затухания a. При малых декрементах затухания до $a \leqslant 0{,}5$ между током и глубиной модуляции λ практически существует пропорциональность вплоть до $\lambda = 0{,}8$—$1{,}0$. Нелинейные искажения основной составляющей тока проявляются так же, как и при омической нагрузке, в расширении динамического диапазона в сторону больших амплитуд. Чем больше амплитуда колебаний сопротивления микрофона (пропорциональная λ), тем больше отклонение амплитудной характеристики основного тона от линейности, особенно при больших декрементах затухания. Нелинейные искажения максимальны при омической нагрузке. Расширение динамического диапазона в области пиковых значений речи не может повлиять отрицательно на разборчи-

вость. Наоборот, при низком уровне ощущения, например, в случае работы через линию с большим затуханием и при шумах значительного уровня, когда ухом улавливаются только шумы с уровнями, близкими к пиковым, нелинейные искажения микрофонной цепи могут даже повысить разборчивость речи.

Попутно можно сделать вывод, имеющий практическое значение при измерении микрофонов, а именно: для того чтобы исключить влияние нелинейных

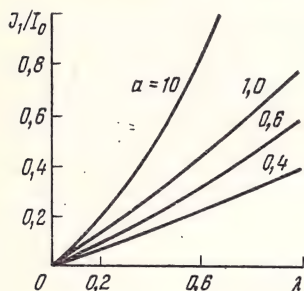


Рис. П2.23. Зависимость отношения $\mathcal{I}_1/I_0$ от глубины модуляции λ при разных дискретных значениях a

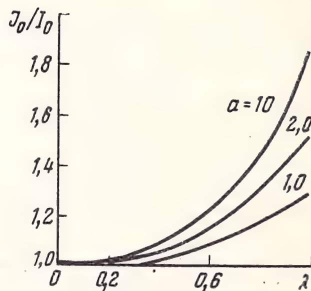


Рис. П2.24. Зависимость отношения $\mathcal{I}_0/I_0$ от глубины модуляции λ при разных дискретных значениях a

искажений измерительной цепи питания микрофона на результаты измерений тех или иных характеристик микрофона, микрофонная цепь должна иметь малую величину a. Практически достаточно, чтобы $a=0{,}1$ В. В этом случае коэффициент нелинейных искажений микрофонной цепи не превысит 2%.

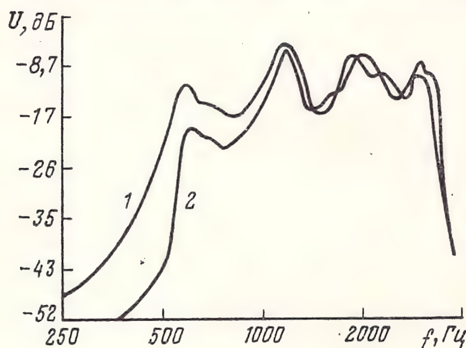


Рис. П2.25. Частотные характеристики микрофона в схеме ТА (кривая *1*) и в измерительной схеме, свободной от искажений (кривая *2*)

Приращение основной составляющей позволяет судить о величине нечетных гармоник. Нечетные гармоники также увеличиваются с ростом λ и a.

Приращение постоянной составляющей $\mathcal{I}_0/I_0$ характеризуется кривыми рис. П2.24. Характер изменения постоянной составляющей и ее зависимости от λ и a сходны с токами для основной составляющей. Приращение постоянной составляющей дает сведения о приращении четных гармоник. Они также растут с увеличением λ и a.

Так как амплитуда основной частоты при заданной величине λ зависит от $a=R/\omega L$, то в результате нелинейности системы амплитуды частотных состав-

ляющих диапазона окажутся измененными непропорционально. Результаты экспериментальной проверки искажений частотной характеристики, вызываемых нелинейностью микрофонной цепи, приведены на рис. П2.25. Сравнение кривых, снятых в схеме телефонного аппарата (кривая *1*) и в измерительной схеме, свободной от искажений (кривая *2*), позволяет установить, что нелинейные искажения микрофонной цепи аппарата обусловливают некоторый подъем отдачи в области низких частот. Об этом же свидетельствуют амплитудные характеристики (здесь не приводятся). На частоте 2500 Гц искажений практически нет. На частоте 500 Гц амплитудная характеристика в реальной микрофонной цепи по мере роста λ становится круче, к искажениям угольного микрофона добавляются искажения микрофонной цепи. В схеме с большим $Q=1/a=\omega L/R$ отдача микрофона ниже, чем в схеме телефонного аппарата (во всем частотном диапазоне, особенно в области нижних частот).

Из вышеизложенного следует, что влияние нелинейных искажений микрофонной цепи на характеристики микрофона выражаются в следующем:

увеличивается крутизна амплитудных характеристик по мере повышения глубины модуляции, динамический диапазон расширяется в сторону пиковых значений входных сигналов;

повышается отдача в области нижних частот спектра;

появляются гармоники.

Все эти искажения обусловлены нелинейностью соотношения между изменением сопротивления микрофона и изменением тока в цепи. Они зависят только от глубины модуляции микрофонной цепи λ и от соотношения между активной и реактивной составляющими цепи $a=R/\omega L$. Они растут с увеличением λ и a. В пределах $a \leqslant 0{,}5$ и $\lambda \leqslant 0{,}5$ можно считать микрофонную цепь практически линейной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

НЕКОТОРЫЕ СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (рис. П3.1—П3.5)

Таблица П3.1

Условия проведения измерений		Уровни шума, дБ, в квартирах					
		окнами на улицу			окнами во двор		
		мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.
Днем	Окна открыты	58—60	61—69	81—89	49—53	56—59	71—80
	Окна закрыты	—	52—60	75—80	41—49	52—58	61—71
Ночью	Окна открыты	—	55	—	—	46	—
	Окна закрыты	—	48	—	—	43	—

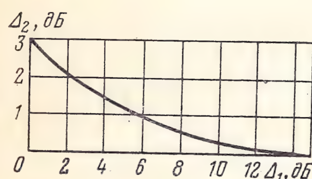


Рис П3.1. График для суммирования уровней по интенсивности:

Δ_2 — разность между суммируемыми уровнями; Δ_1 — величина, которую надо прибавить к большему из суммируемых уровней

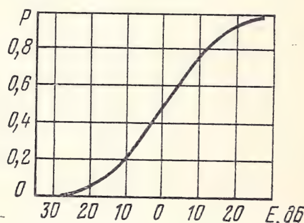


Рис. П3.2. Зависимость вероятности восприятия P от уровня ощущения E'

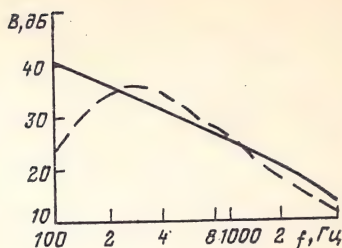


Рис. П3.3. Спектры речи и Хотта в свободном звуковом поле

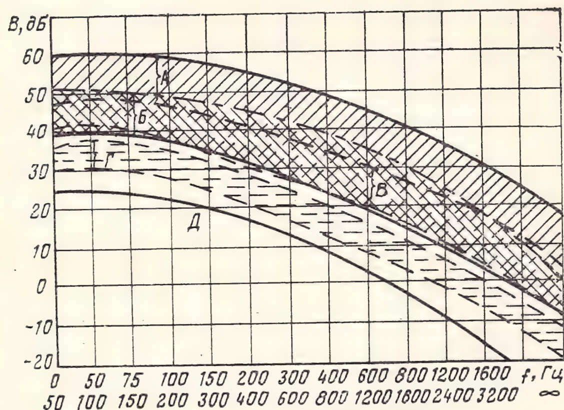


Рис. П3.4. Спектральные уровни шумов:

тяжелого транспорта (зона *А*), среднего транспорта (зона *Б*), на промышленных площадях (зона *В*), шум в жилых помещениях днем (зона *Г*), шум в жилых помещениях ночью (кривая *Д*)

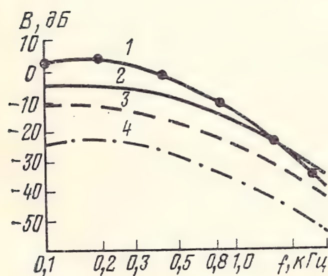


Рис. П3.5. Спектральные характеристики шумов в линиях по результатам измерений на сетях Мытищинского и Коломенского узлов связи Московской области

Таблица П3.2

Уровни интенсивности шума, дБ	Встречаемость помех, %	
	в кабинетах руководителей	в служебных помещениях на 2—3 человека
36—40	10	0
41—45	20	8,1
46—50	34	16,6
51—55	22	24
55—60	12	22,8
61—65	2	18,5
66—70	0	10

Обобщенные сведения об уровнях акустических шумов, дБ [24], приведем ниже:

учреждения . . . . 30—75
театры, школы, больницы . . . . 20—110
производственные помещения . . . . 90—113
транспортные шумы . . . . 55—90

Величины спада спектральных характеристик различных электрических помех в сторону верхних частот, дБ/окт:

станционные шумы . . . . 6—7
наводки от энергосетей . . . . 15—25
то же, от радио 15
речевые помехи в каналах 6
помехи от передачи дискретной информации 20

Напряжения электрических шумов, мВ псоф: городские кабельные сети в 82—93% случаев . . . . $\leqslant 0{,}2$
в 86—90% случаев . . . . $\leqslant 0{,}3$
станционные шумы на АТС 0,9
собственные шумы ТА (на линейных зажимах) . . . . . 0,1—0,16

Список литературы

1. **Gaucher.** «Journal of the Franclin Institute», 1934, april.
2. **Федосьев В. И.** Упругие элементы точного приборостроения. М., Оборонгиз, 1949.
3. **ГОСТ** 7152—68. Микрофоны угольные общего применения. Методы электроакустических испытаний.
4. **ГОСТ** 7152—74. Микрофоны угольные общего применения. Методы электроакустических испытаний.
5. **Вентцель Е. С.** Теория вероятности. М., Госуд. изд-во физико-матем. литературы, 1962.
6. **МККТ,** 1937/1938. Передача. Документ № 046.
7. **Репина О. И.** Пути улучшения характеристик разговорного тракта телефонного аппарата. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1959.
8. **Holm.** Zeitschritt für technische Physik, 1922, N 9, 10, 11.
9. **Korn T.** Elektroakustische grundlagen der Güte des Fernsprechapparaten,—«ENT», 1939, 13, 16, N 2.
10. **Kett R. W.** Carbon Microphones for Communication.—«Proceedings the Inst. of Radio and Electronics Engineers Australia», 1964, v. 25, N 4.
11. **Mac—Millan.** Post Office Electrical Eng. Journal, Oct., 1938.
12. **Joschek.** «Wissenschaftliche Veröfentlichungen d. Siemens Werke», 1937, N 1.

13. **Hara G.** Theorie der akustischen Schwingungsausbreitung in gekörnten Substanzen und exsperementele Untersahungen an Konlenpulver.—«ENT», 1935, B. 12, N 7.
14. **Christensen.**—«BSTJ», Apr., 1936.
15. **Доклад** японской делегации на XVI пленарном заседании МККФ.
16. **Graisdal.** Journal of Appl. Physik, 1953, v. 24, N 9.
17. **Белянкина А. И.** Исследование угольных микрофонных порошков. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Л., 1964.
18. **Braun K.** Theoretische und experimentale Untersuchung der hichtlineare Verzerrungen von Kohlenmikrophonen.—«TFT», 1938, B. 27, N 11.
19. **Madia** Elektrische Nachrichtentechnik, 1934, N 1; 1935, N 11.
20. **Яковлев А. И.** Нелинейные искажения одной микрофонной цепи. — «Электросвязь», 1939, № 3.
21. **Яковлев А. И.** Микрофонные функции. «Доклады Академии наук СССР». Новая серия. 1948, т. 59, № 4.
22. **Иофе В. К.** О предельной чувствительности микрофона — преобразователя. — «ЖТФ», 1938, т. 8, № 10.
23. **Nakano.** El. Comm. Lab. Tech. Journal, 1958, v. 7, N 12.
24. **Карагодина И. Л.** Городские и жилищно-коммунальные шумы и борьба с ними. М., «Медицина», 1964.
25. **Иофе В. К., Янпольский А. А.** Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М., Госэнергоиздат, 1954. 523 с.
26. **Сапожков М. А.** Защита трактов проводной и радиосвязи от помех и шумов. М., Связьиздат, 1959. 254 с.
27. **Финклер И. Е.** Электроакустические характеристики телефонного тракта. М., Связьиздат, 1961. 132 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

1

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КАЧЕСТВО ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ (В ПРЕДЕЛАХ ЛИНЕЙНЫХ СООТНОШЕНИЙ)

1.1. Ширина полосы эффективно передаваемых частот 5
1.2. Частотная характеристика 7
1.3. Динамический диапазон 9
1.4. Помехозащищенность тракта 13
1.5. Местный эффект и его влияние 19
1.6. Об увеличении затухания цепи местного эффекта 23
Список литературы 29

2

ТРЕБОВАНИЯ К ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТЕЛЕФОННОГО АППАРАТА

2.1. Исходные положения 31
2.2. Оптимальные характеристики 32
2.3. Рациональные характеристики 33
2.4. Предельно целесообразные характеристики 34
2.5. Влияние местного эффекта на характеристики $R_{м.т.ц}$ 37
2.6. Ограничивающее влияние переходных разговоров на общий коэффициент передачи $R_{а}$ 38
2.7. Требования к характеристикам коэффициента передачи аппарата . 44
2.8. Уровень на выходе телефонного аппарата 47
2.9. Влияние помех на требования к характеристикам телефона . . . 50
2.10. Работа аппарата на коротких линиях 54
Список литературы 55

3

ДИНАМИЧЕСКИЕ И АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

3.1. Исходные положения 56
3.2. Основные понятия о динамических и амплитудных характеристиках . 57
3.3. Аппроксимация динамических (амплитудных) характеристик . . . 58
3.4. Некоторые свойства периодических функций 61
3.5. Получение гармонического спектра на выходе по динамической характеристике 64
3.6. Получение динамической характеристики 65
3.7. Типы динамических (амплитудных) характеристик 66
Список литературы 70

4

ХАРАКТЕР ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНЫЕ УСТРОЙСТВА, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ МАЛЫЕ АМПЛИТУДЫ

4.1. Предварительные замечания 70
4.2. Ограничение одиночного синусоидального колебания 71

Стр.

4.3. Изменение соотношения между сигналами при их раздельном прохождении через нелинейное звено 74
4.4. Изменение соотношения между сигналами при совместном прохождении их через нелинейное звено 75
4.5. Изменение динамической характеристики при действии дополнительного тона (сигнала) 77
4.6. Продукты нелинейности при одновременном действии двух синусоидальных сигналов 81
4.7. Продукты нелинейности при многочастотном сигнале 84
4.8. Изменение отношения сигнал/шум 86
Список литературы 86

5

ХАРАКТЕР ЯВЛЕНИЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ НЕЛИНЕЙНОЕ УСТРОЙСТВО, ОГРАНИЧИВАЮЩЕЕ БОЛЬШИЕ АМПЛИТУДЫ

5.1. Исходные положения 87
5.2. Ограничение одного синусоидального тона 88
5.3. Ограничение двух тонов при их одновременном действии 89
5.4. Ограничение сложных сигналов 91
5.5. Влияние верхнего ограничения на сигналы при их последовательном действии 93
5.6. Взаимное влияние речи и шума при верхнем ограничении . . . 93
5.7. Спектр на выходе компрессора при одиночном синусоидальном сигнале на входе 94
Список литературы 94

6

КРИТЕРИИ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

6.1. Исходные положения 94
6.2. Оценка по продуктам нелинейности на одной частоте 95
6.3. Оценка по продуктам нелинейности на двух частотах 98
6.4. Оценка по продуктам нелинейности на шумовых полосах 99
6.5. Оценка по продуктам нелинейности на действительной программе . 102
6.6. Оценка по линейности амплитудной характеристики 104
6.7. Некоторые недостатки существующих способов измерения амплитудных характеристик 105
Список литературы 108

7

ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ЗВУЧАНИЯ И РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)

7.1. Предварительные замечания 110
7.2. Влияние продуктов нелинейности на качество передачи 110
7.3. Влияние гармоник и комбинационных тонов на разборчивость речи . 112
7.4. Влияние верхнего амплитудного ограничения на качество и разборчивость речи при отсутствии шума 112
7.5. Влияние верхнего и нижнего амплитудного ограничения на разборчивость речи в условиях шума 114
7.6. О клиппировании речи 116
7.7. Сжиматели и расширители и их влияние на разборчивость речи и шумозащищенность 118
7.8. Некоторые итоговые замечания 118
Список литературы 119

8

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ И ПОМЕХИ

8.1. Исходные положения 121
8.2. Учет влияния частотных характеристик отдельных звеньев цепи на шумозащищенность тракта 122
8.3. Установление связи между уровнем ощущения, показателем нелинейности и порогом слышимости для нелинейной системы 123
8.4. Влияние нижнего ограничения на разборчивость речи 128
8.5. Разборчивость речи при верхнем амплитудном ограничении . . . 132
8.6. Компрессия 135
8.7. Об условиях, мешающих применению нижнего ограничения для подавления переходных разговоров 138
8.8. Амплитудное ограничение и компрессия на передаче как один из способов борьбы с переходными разговорами 142
8.9. Подавление речевых помех в цепях управления громкоговорящих телефонных аппаратов (ГТА) 143
Список литературы 152

Приложение 1. Результаты разложения показательной функции $y=x^n$ в степенной полином 153

Приложение 2. Нелинейные искажения угольного микрофона и микрофонной цепи 153
П2.1. Угольный микрофон как нелинейное устройство 153
П2.2. Статическая жесткость угольного микрофона 154
П2.3. Динамическая жесткость угольного микрофона 155
П2.4. О влиянии кривых жесткости угольного порошка на ход амплитудных характеристик микрофона 157
П2.5. Влияние утряски на жесткость порошка и на амплитудные характеристики микрофона 159
П2.6. О параметрах угольной ячейки, определяющих ход кривых жесткости и амплитудных характеристик 161
П2.7. Частотные характеристики угольного микрофона 162
П2.8. Нелинейные искажения микрофонной цепи 163

Приложение 3. Некоторые справочные материалы 168

Список литературы 170

ИБ № 273

Ольга Ивановна Репина

ИСКАЖЕНИЯ В ТЕЛЕФОННОМ ТРАКТЕ

Редактор **Е. В. Комарова**

Обложка художника **Л. Я. Катаева**

Художественный редактор **Р. А. Казаков**

Технические редакторы **Е. Р. Черепова, Г. И. Колосова**

Корректор **Р. И. Прокофьева**

Сдано в набор 20/XII 1977 г. Подп. в печ. 27/III 1978 г.
Т-01278 Формат 60×90/16 Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная
Печать высокая 11,0 усл. печ. л. 12,25 уч.-изд. л. Тираж 7000 экз.
Изд. № 18122 Зак. № 328 Цена 60 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Издательство «Связь» в 1979 г. выпускает следующие книги:

Цыбулин М. К. Эхозаградительные устройства на сети многоканальной связи. М.: Связь, 1979 (I кв.).— 7 л., ил.—35 к. 5000 экз. 30602.

Описывается явление электрического эха, возникающего в каналах связи большой протяженности, рассматриваются возможные методы борьбы с мешающим действием токов эха, дается обзор существующих типов эхозаградителей отечественного и зарубежного производства. Особое внимание уделяется вопросам эксплуатации каналов связи, оборудованных эхозаградительными устройствами.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием, настройкой и эксплуатацией телефонных каналов связи.

Лутов М. Ф. Дополнительные виды обслуживания абонентов современных АТС.—М.: Связь, 1979 (I кв.).— 8 л., ил.—50 к. 7000 экз. 30602.

Рассматриваются основные виды услуг, предоставляемых абонентам городских и учрежденческих АТС. Дается классификация телефонных услуг, предоставляемых абонентам. Обосновывается необходимость введения ряда дополнительных услуг и приводятся способы реализации услуг в АТС. Большое внимание уделяется введению дополнительных видов обслуживания в АТС с программным управлением.

Книга предназначена для инженерно-технических работников.

Эти книги можно приобрести во всех магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.

60 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СВЯЗЬ»